

Romeu Corrêa Lucena

**ANÁLISE TEÓRICA DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE
PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA**

Florianópolis

2017



Romeu Corrêa Lucena

**Análise teórica de rigidez e resistência à flexão de painéis de madeira
lamelada colada cruzada**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito para a obtenção do Título de Engenheiro
Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ângela do Valle

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lucena, Romeu

Análise de rigidez e resistência à flexão de painéis de
madeira lamelada colada cruzada / Romeu Lucena ;
orientadora, Ângela do Valle, 2017.
74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Madeira lamelada colada
cruzada, modelagem em elementos finitos. I. do Valle,
Ângela. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Romeu Corrêa Lucena

**Análise teórica de rigidez e resistência à flexão de painéis de madeira lamelada
colada cruzada**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Programa de Engenharia Civil

Florianópolis, 24 de Novembro de 2017.

Prof^a. Luciana Rohde, Dr^a.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Prof^a. Ângela do Valle, Dr^a.

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodrigo Figueiredo Terezo, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof^a. Poliana Dias de Moraes, Dr^a.

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais e às minhas irmãs, pelos
quais guardo infinito carinho.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a. Ângela do Valle, pela confiança, impressionante dedicação e sempre presente orientação.

Ao Professor Rodrigo Terezo, pela grande contribuição com o trabalho, pelos valiosos conselhos e por me proporcionar, com o estágio final, engrandecimento pessoal e profissional.

Aos colegas e amigos Guilherme Motta, João Laryan e Leonardo Coelho, os quais, sem a ajuda, este trabalho não teria acontecido. Mas também pelas experiências compartilhadas no Laboratório de Materiais e Construções.

Ao meu padrinho Alexandre Macedo, que nunca falta quando é preciso.

À RIGHEZ Madeiras LTDA. pela doação da madeira utilizada nos painéis, incentivando a pesquisa na região serrana.

Ao Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira (GIEM), onde nasceu meu interesse por esse fascinante material, em especial ao servidor Ivan Ribas, que realiza grande trabalho com os alunos do grupo.

E finalmente aos meus amigos e familiares pelo apoio e incentivo.

RESUMO

A madeira lamelada colada cruzada, ou cross laminated timber (CLT), é um material construtivo de tecnologia recente, fabricado com madeira de reflorestamento, que vem chamando atenção por suportar grandes esforços utilizando material considerado, no Brasil, de baixa qualidade construtiva. Trata-se de painéis constituídos por tábuas de madeira serrada, com várias camadas dispostas transversalmente entre si e colada. No trabalho são apresentados o processo de fabricação de painéis de CLT confeccionados no Centro Agroveterinário da UDESC em Lages, elaborados com madeira serrada de *Pinus taeda* obtida de floresta plantada da região serrana. Analisaram-se suas propriedades mecânicas por meio de ensaios e de modelagens estruturais por um método analítico e pelo método dos elementos finitos. A comparação entre os deslocamentos medidos nos ensaios e os valores estimados pelo método analítico, possui variação máxima de 18,4% e mínima de 1,7%. Já pelo método dos elementos finitos, possui variação máxima de 15,8% (P5A) e mínima de 2,7% (P1B). Foi estimada a carga de ruptura dos painéis para ensaio de flexão, que será realizado futuramente no Laboratório de Experimentação em Estruturas da UFSC.

Palavras-chave: Madeira Lamelada Colada Cruzada; CLT; Estrutura; Modelagem em elementos finitos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de um painel de CLT	17
Figura 2 - Blocos Habitacionais Puukuokka em Jyväskylä, Finlândia.	20
Figura 3- Maquete virtual do Edifício AMATA	21
Figura 4 – Imagem do modelo do edifício AMATA no programa RFEM	21
Figura 5 - Teste de flexão de CLT pela norma BS EN 16351:2015	25
Figura 6 – Exemplo de seção original e seção transformada pelo MHS.....	26
Figura 7 - Separação das vigas usando o método da analogia de cisalhamento	27
Figura 8 - Esquema ilustrando as distâncias Z e Z_i , com $i=1$ e $i=2$	28
Figura 9 - Ilustração da distância a	28
Figura 10 - Seção transformada para obtenção do módulo de cisalhamento	29
Figura 11 - Tensão axial devida à parcela de tração/compressão e a parcela de flexão	31
Figura 12 - Esquema estático do ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade das tábuas.....	34
Figura 13 – Dimensões da seção transversal da seção transformada em mm.	35
Figura 14 - Resultados de deslocamentos em mm da modelagem em elementos finitos do corpo de prova do teste preliminar	37
Figura 15 - Ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade com carregamento de 21 N.....	39
Figura 16 - Dimensões dos painéis.....	40
Figura 17 - Painel de CLT produzido no CAV	41
Figura 18 – Disposição das tábuas utilizadas no painel 1	43
Figura 19 - Aplicação de cola num painel.....	44
Figura 20 – Prensagem do painel	45
Figura 21 - Ensaio de flexão do painel.....	46
Figura 22 - Imagem do monitor durante uso do programa HBM Catman Easy para leitura da carga e do deslocamento durante o ensaio de flexão.....	46
Figura 23 - Esquema de análise de BA	50
Figura 24 - Esquema de obtenção de BB	50
Figura 25 – Seções de CLT original e transformada pelo MHS	51

Figura 26 - Esquema de obtenção de h/G_b , necessário para calcular GA	51
Figura 27 - Distâncias entre pontos de aplicação de cargas e apoios para o ensaio de resistência à flexão.....	52
Figura 28 – Entrada de dados das características de um dos painéis no módulo RF-Laminate.....	53
Figura 29 – Entrada de dados dos valores de resistência mecânica média dos painéis no módulo RF-Laminate.....	53
Figura 30 – Dados dos painéis para análise de deslocamento no programa RFEM, com carga em kN e distância em m.....	54
Figura 31- Dados dos painéis para análise de capacidade de carga no programa RFEM, com carga em kN e distância em m.....	54
Figura 32 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P1A.....	70
Figura 33 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P1B.....	70
Figura 34 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P2A.....	71
Figura 35 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P2B.....	71
Figura 36 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P3A.....	71
Figura 37 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P3B.....	72
Figura 38 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P4A.....	72
Figura 39 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P4B.....	72
Figura 40 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P5A.....	73
Figura 41 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P5B.....	73
Figura 42 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P1A.....	74
Figura 43 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P1B.....	74
Figura 44 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P2A.....	74
Figura 45 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P2B.....	75
Figura 46 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P3A.....	75
Figura 47 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P3B.....	75
Figura 48 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P4A.....	76
Figura 49 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P4B.....	76
Figura 50- Gráfico da tensão de ruptura do painel P5A.....	76
Figura 51 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P5B.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Requisitos mecânicos de painéis de CLT segundo ETA 06/0138 (2012)	19
Quadro 2 - Levantamento dos programas internacionais para estruturas de madeira	22
Quadro 3 – Valores de geometria, de carregamentos aplicados, de deslocamentos medidos de E_x das tábuas utilizadas no teste preliminar.	34
Quadro 4 – Deslocamentos medidos no ensaio de flexão do conjunto de duas tábuas do teste preliminar	35
Quadro 5 – Deslocamentos estimados pelo MHS com os dados do teste preliminar	36
Quadro 6 - Transformação da carga pontual para carga distribuída ao longo de 198 mm.	36
Quadro 7 - Deslocamentos obtidos pelo ensaio, MHS e MEF para o corpo de prova do teste preliminar	38
Quadro 8 – Lista das tábuas ordenadas pelo módulo de elasticidade longitudinal na flexão.	42
Quadro 9 - Valores das características mecânicas das tábuas	47
Quadro 10 – Valores médios de resistência do lote de tábuas (MPa)	50
Quadro 11 – Valores de planilha para obter a carga máxima num painel	52
Quadro 12 - Resumo dos deslocamentos obtidos e a diferença entre eles	55
Quadro 13 - Deslocamento obtido pelo método analítico com e sem influência do cisalhamento	56
Quadro 14 - Módulo de elasticidade experimental global dos painéis	57
Quadro 15 - Valores das cargas máximas P_{max} e das tensões máximas σ_{local} , σ_{global} e σ_{max} dos painéis pelo método analítico	58
Quadro 16 - Valores das cargas e tensões máximas (σ_{local} , σ_{global} e σ_{max}) dos painéis pelo método dos elementos finitos	58
Quadro 17 - Comparativo das cargas de ruptura por flexão dos painéis previstas pelo método analítico e dos elementos finitos	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAF – Associação Brasileira de Florestas Plantadas

CLT – Cross Laminated Timber

CAV – Centro de Ciências Agroveterinárias

ETA – European Technical Approval

MHS – Método da Homogeneização da Seção

MEF – Método dos Elementos Finitos

LEE – Laboratório de Experimentação em Estruturas

f_{t0} – Resistência à tração paralela às fibras

f_{t90} – Resistência à tração normal às fibras

f_{c0} – Resistência à compressão paralela às fibras

f_{c90} – Resistência à compressão normal às fibras

f_M – Resistência na flexão

f_v – Resistência ao cisalhamento

$f_{R,v}$ – Resistência ao cisalhamento por rolamento

E_x – Módulo de elasticidade na direção longitudinal

E_y – Módulo de elasticidade na direção radial

E_z – Módulo de elasticidade na direção tangencial

G_{xy} – Módulo de cisalhamento no plano longitudinal tangencial

G_{yz} – Módulo de cisalhamento no plano radial tangencial

G_{xy} – Módulo de cisalhamento no plano longitudinal radial

ν_{xy} – Coeficiente de Poisson, dado pela relação entre a deformação na direção tangencial (T) e a deformação na direção longitudinal (L), para um esforço axial na direção L

ν_{yx} – Coeficiente de Poisson, dado pela relação entre a deformação na direção L e a deformação na direção T, para um esforço axial na direção T

I – Momento de inércia

κ - coeficiente de fator de forma no cisalhamento

OOPEAA – *Office for Peripheral Architecture*

UFSJ - Universidade Federal de São João del-Rei

UPF – Universidade Passo Fundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	O CLT.....	17
2.1.1	Breve histórico	17
2.1.2	Processo de fabricação do CLT.....	18
2.1.3	Requisitos de módulo de elasticidade de painéis de CLT	19
2.1.4	Exemplos de construções em CLT	19
2.2	LEVANTAMENTO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	22
2.3	PROPRIEDADES DA MADEIRA NECESSÁRIAS PARA AS MODELAGENS..	23
2.3.1	Características do material.....	23
2.3.2	Resistência do material	24
2.4	ENSAIO DE FLEXÃO PELA NORMA BS EN 16351:2015	25
2.5	MÉTODOS USADOS PARA MODELAGEM DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PAINÉIS DE CLT	25
2.5.1	Método da homogeneização da seção	25
2.5.2	Método da analogia de cisalhamento (Kreuzinger).....	27
2.5.3	Resistência à flexão.....	30
2.5.4	Método dos elementos finitos.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODO	33
3.1	TESTE PRELIMINAR.....	33
3.1.1	Caracterização e preparação do corpo de prova para o teste preliminar	33
3.1.2	Módulo de elasticidade do corpo de prova.....	34
3.1.3	Ensaio de flexão do corpo de prova	35
3.1.4	Modelagem analítica do corpo de prova e comparação.....	35

3.2	PARTE EXPERIMENTAL.....	38
3.2.1	Madeira	38
3.2.2	Módulo de elasticidade das tábuas.....	38
3.2.3	Características do painel.....	39
3.2.4	Seleção das tábuas para a confecção dos painéis.....	41
3.2.5	Montagem dos painéis.....	43
3.2.6	Ensaio de flexão nos painéis	45
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA DO PAINEL.....	47
3.3.1	Propriedades da madeira utilizadas nas modelagens	47
3.3.2	Método analítico	50
3.3.2.1	Análise de deslocamento	50
3.3.2.2	Análise de capacidade de carga dos painéis	51
3.3.3	Método de elementos Finitos	53
4	RESULTADOS E ANÁLISES	55
4.1	RESULTADOS E COMPARAÇÕES ENTRE DESLOCAMENTOS.....	55
4.2	ANÁLISE DE CAPACIDADE DE CARGA DOS PAINÉIS	57
4.2.1	Carga e tensões máximas pelo método analítico.....	57
4.2.2	Carga e tensões máximas pelo método dos elementos finitos.....	58
4.2.3	Comparação e análise das cargas e tensões máximas pelos métodos analítico e de elementos finitos.....	58
5	CONCLUSÃO	60
6	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – Gráficos Força x Deslocamento dos painéis ensaiados por flexão.....	65
	APÊNDICE B – Imagens dos resultados dos deslocamentos dos painéis gerados pelo RFEM	70
	APÊNDICE C – Imagens dos gráficos de tensões dos painéis gerados pelo RF-Laminate.....	74

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande potencial para construções de lamelado colado utilizando madeira de reflorestamento. Segundo levantamento realizado pela ABRAF, o país possui em seu território 7,2 milhões de hectares de florestas plantadas, isso representa 52% dessas florestas na América do Sul. Em Santa Catarina, são 646 mil hectares, sendo 83% apenas de *Pinus*, o segundo estado com maior área plantada dessa espécie de madeira no Brasil. Nesse estado, existem quase 5 mil empresas do setor florestal, responsáveis por 90,6 mil empregos diretos (ACR, 2014). Dentre os produtos dessas empresas estão o papel e a celulose, os móveis de madeira e a madeira serrada.

Porém, a madeira ainda é subutilizada no setor da construção civil, segundo Szücs (apud Meirelles, 2007). O uso de técnicas construtivas inadequadas no Brasil, ao longo de sua história, fez com que as construções em madeira sejam sinônimos de sub-habitação ou de pouca durabilidade. Os novos paradigmas de sustentabilidade e as transformações que a sociedade vem passando fazem com que esse estigma necessite ser revisto.

Um meio de utilizar a madeira serrada de *Pinus* de forma eficiente na construção civil, agregando alto valor ao produto, é utilizando a matéria prima na produção de tábuas de lamelado colado, como a recente tecnologia conhecida como Madeira Lamelada Colada Cruzada, ou Cross Laminated Timber (CLT).

O CLT é um produto de madeira engenheirada inovador, que vem tentando ultrapassar o domínio de dois grandes materiais estruturais, o concreto e o aço. Construções de CLT vêm ganhando atenção uma vez que conseguem ser mais rápidas, limpas e sustentáveis que as estruturas tradicionais. Ainda insipiente no Brasil, nos últimos cinco anos o uso de CLT em construções cresceu substancialmente na Europa, América do Norte e Austrália. O material está sendo usado para construir impressionantes casas, escritórios, escolas e edifícios.

De forma a analisar a rigidez e a resistência mecânica dos painéis produzidos no CAV com madeira plantada na região serrana de Santa Catarina, e validar seu desempenho construtivo, foi feita a comparação entre os deslocamentos dos painéis, submetidos à uma certa carga no meio do vão, de três maneiras: (1) por meio de ensaio em laboratório, (2) por meio de modelagens estruturais pelo método analítico da analogia de cisalhamento e (3) pelo método dos elementos finitos utilizando o programa RFEM.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivo analisar o deslocamento e determinar a carga de ruptura por flexão dos painéis de madeira lamelada colada cruzada confeccionados com *Pinus taeda* no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), por meio de modelagem analítica e computacional pelo método dos elementos finitos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) apresentar a Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT) e seu modo de fabricação;
- b) analisar o deslocamento dos painéis de CLT produzidos no CAV por meio de ensaio e modelagem estrutural (método analítico e dos elementos finitos).
- c) estimar a capacidade de carga dos painéis de CLT produzidos no CAV;
- d) validar o uso de um modelo com elementos finitos para análises de estruturas lameladas de madeira.

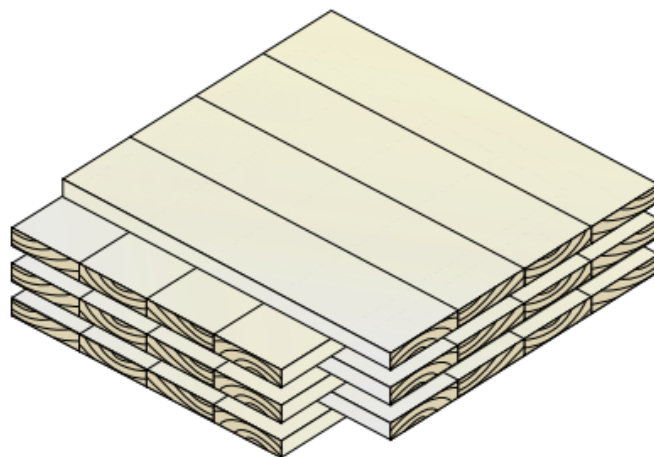
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O CLT

O painel de Madeira Lamelada Colada Cruzada, também conhecido por sua abreviação em inglês CLT (*Cross Laminated Timber*) ou X-lam, consiste no painel pré-fabricado formado por camadas de tábuas de madeira sobrepostas de forma cruzada (usualmente 90 graus) com suas faces mais largas coladas entre si e, em alguns casos, com as faces menores também. Os painéis de CLT são fabricados, geralmente, com 3 a 7 camadas, variando em número ímpar. Em configurações especiais, camadas seguidas podem estar dispostas na mesma direção, para obter características estruturais específicas. A espessura das tábuas individuais pode variar de 16 a 50 mm, e largura de 60 a 240 mm. O tamanho dos painéis varia de acordo com o fabricante, a largura costuma variar de 60 a 300 cm e o comprimento pode chegar até 18 m. O transporte é um fator limitante do tamanho dos painéis (CLT Handbook, 2013).

A Figura 1 ilustra a configuração de um painel de CLT.

Figura 1 - Ilustração de um painel de CLT



Fonte: CLT Handbook (2013).

2.1.1 Breve histórico

O CLT foi introduzido, de forma inovadora, no início dos anos 90 na Áustria e na Alemanha, e vem ganhando popularidade em construções residenciais e não residenciais na

Europa. No meio dos anos 90, a indústria e as universidades austríacas, de maneira colaborativa, promoveram pesquisas que desenvolveram o que conhecemos como o CLT moderno. No início dos anos 2000, houve um aumento considerável nas construções em CLT, em parte por conta do movimento de construções verdes, mas também pela boa aceitação e aumento da propaganda do produto. A experiência europeia mostra que construções em CLT podem ser competitivas, particularmente em construções médias (de 5 a 10 andares). O fácil manuseio durante a construção e as vantagens da pré-fabricação facilitam a rápida execução do projeto. Como os painéis são leves comparados a outros sistemas construtivos, as fundações podem ser mais rasas. Outras vantagens são o bom isolamento térmico e acústico. (CLT Handbook, 2013).

Painéis de CLT também possuem boa resistência à ação do fogo. Isso se deve à natureza das peças espessas de madeira que podem queimar lentamente e criar uma camada superficial carbonizada, que impede que a madeira queime por dentro, permitindo que o sistema de madeira mantenha uma capacidade estrutural significativa por períodos prolongados quando exposto ao fogo. Os fatores que influenciam na performance do CLT ao fogo são a espécie de madeira, o tipo de adesivo, a espessura do painel, a espessura das camadas, a ligação entre os painéis e os métodos de proteção usados. (CLT Handbook, 2013).

2.1.2 Processo de fabricação do CLT

Segundo Mohammad (2012), o processo de fabricação típico do CLT inclui os seguintes passos: seleção da madeira, plainar a madeira, aplicação de adesivo, montagem e pressão, corte do produto, marcação e embalagem. A chave para um processo de fabricação de CLT satisfatório está na qualidade da madeira e no controle dos parâmetros que influenciam na qualidade da ligação do adesivo. Testes de controle de qualidade são necessários para confirmar se o produto final de CLT irá servir para as aplicações planejadas.

A madeira deve ser seca em estufa para um teor de umidade de 12%. Este teor de umidade é apropriado para prevenir variações de dimensões e rachaduras na superfície, otimizar as propriedades mecânicas e baratear os custos de transporte. Ligações de emenda dentada (*finger joints*) podem ser usadas para obter o comprimento desejado e eliminar defeitos da madeira, como nós.

O tempo do processo de montagem de um painel varia de 15 min a 1 hora, dependendo dos equipamentos e adesivos. Os adesivos utilizados podem ser de poliuretano, melamina e a base de compostos fenólicos. As duas faces das tábuas e as bordas podem ser coladas. Uma vez que o adesivo é aplicado, é realizada prensagem hidráulica (mais comum)

ou a vácuo e com ar comprimido, dependendo da espessura do painel e adesivo utilizado. Os painéis montados são plainados ou lixados para que a superfície fique lisa no final do processo. Eles são cortados no tamanho desejado e aberturas são feitas para portas, janelas, instalações hidráulicas e elétricas.

As seguintes características dos painéis, devem ser levadas em conta: as resistências à flexão, à tração e à compressão paralela e normal às fibras e ao cisalhamento; a rigidez; deformação instantânea e fluência; a vibração do piso; a resistência ao fogo; o isolamento térmico e acústico e a durabilidade. (M. Mohammad, 2012)

2.1.3 Requisitos de módulo de elasticidade de painéis de CLT

O documento técnico European Technical Approval ETA 06/0138 recomenda valores mínimos de módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e resistência (ETA 06/0138, 2012). O Quadro 1 foi adaptado e traduzido deste documento para o trabalho.

Quadro 1 - Requisitos mecânicos de painéis de CLT segundo ETA 06/0138 (2012)

Requisito	Valor médio (m) ou característico (k)
Módulo de elasticidade na flexão	
paralelo às fibras ($E_{x,m}$)	12000 MPa
perpendicular às fibras ($E_{y,m}$)	370 MPa
Módulo de cisalhamento	
paralelo às fibras (G_m)	690 MPa
perpendicular às fibras, módulo de <i>rolling shear</i> (GR_m)	50 MPa
Resistência à flexão	
paralela às fibras ($f_{M,k}$)	24 MPa
Resistência à tração	
perpendicular às fibras ($f_{t,90,k}$)	0,12 MPa
Resistência à compressão	
perpendicular às fibras ($f_{c,90,k}$)	2,7 MPa
Resistência ao cisalhamento	
paralela às fibras ($f_{v,k}$)	2,7 MPa
perpendicular às fibras, resistência de <i>rolling shear</i> ($f_{R,v,k}$)	1,5 MPa

2.1.4 Exemplos de construções em CLT

Um exemplo de construções altas em CLT são os blocos habitacionais Puukuokka (Figura 2), localizados na Finlândia, projetado pelo escritório OOEPA em parceria com Lakea Oy, em 2015. A Puukuokka é um complexo de apartamentos composto de 3 edifícios de 6 a 8 pavimentos. Toda a estrutura de suporte de carga é formada pelos módulos de CLT.

No interior, a estrutura de CLT foi exposta nos tetos, pisos e escadas dos corredores. Na visão do escritório de arquitetura, trabalhar com CLT apresentou vários aspectos importantes: a qualidade isolante da madeira maciça permitiu controlar a temperatura de apartamentos individuais independente do espaço do corredor. Isso permite um corredor espaçoso com muita luz, realizado de forma eficiente em termos de energia como um espaço semiquente. O uso de módulos de CLT também possibilitou integrar as instalações prediais na estrutura de paredes do corredor, maximizando o espaço nos apartamentos. O uso de módulos reduziu o tempo de construção no local em até seis meses, também reduziu a exposição às condições climáticas e produziu uma maior qualidade no resultado final (OOPEAA, 2017).

Figura 2 - Blocos Habitacionais Puukuokka em Jyväskylä, Finlândia.



Fonte: OOPEAA (2017).

No Brasil, já está em fase de projeto o primeiro prédio de CLT. Assinado pelo escritório de arquitetura franco-brasileiro Triptyque, em parceria com a Carpinteria Estruturas de Madeira. O projeto prevê a construção de uma torre escalonada de 13 pavimentos, que totalizará 4700 m² de área construída. O edifício que foi batizado de AMATA será construído na Vila Madalena, bairro nobre de São Paulo (R. BARATTO, 2017). O modelo virtual do prédio está ilustrado na Figura 3.

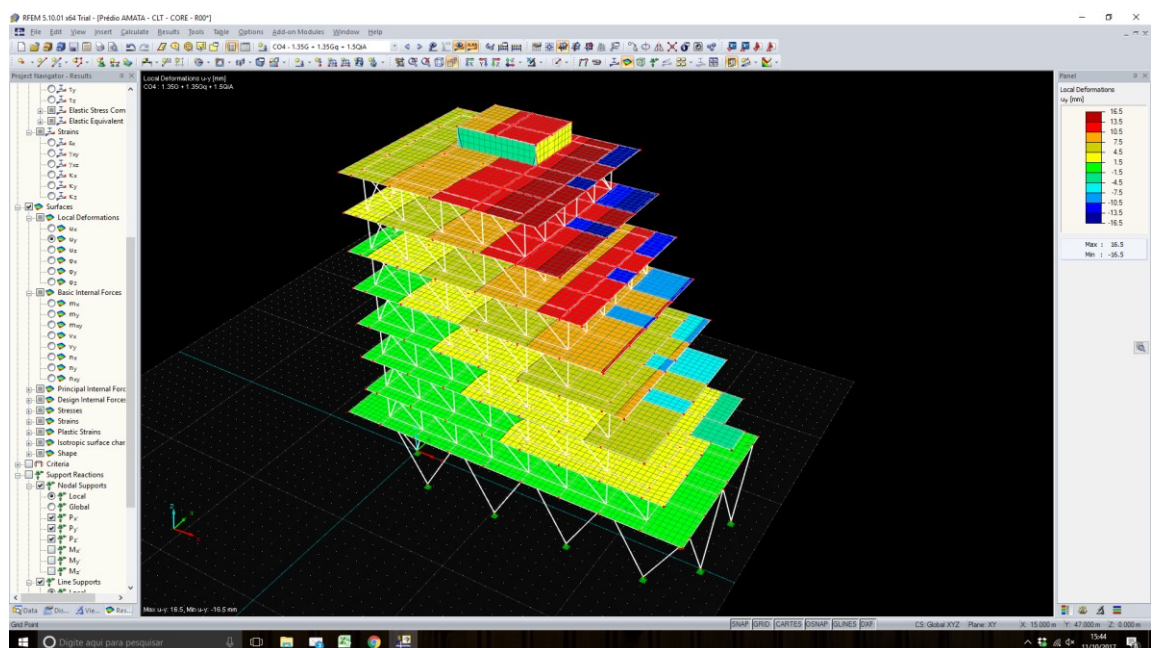
Figura 3- Maquete virtual do Edifício AMATA



Fonte: Archdaily (2017).

O programa computacional utilizado para modelar a estrutura desta edificação é o Dlubal RFEM, a Figura 4 mostra a modelagem dos pilares e treliças de cada andar, as lajes em estrutura de CLT e o núcleo de CLT para os elevadores e escada.

Figura 4 – Imagem do modelo do edifício AMATA no programa RFEM



Fonte: Carpinteria (2017).

2.2 LEVANTAMENTO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Para realização do trabalho, foi necessário fazer um levantamento dos programas de análise estrutural de placas disponíveis para modelagem de madeira lamelada colada cruzada, levando-se em conta suas limitações, normas adotadas, materiais e disponibilidade. Também foi indispensável que o programa disponibilizasse versão gratuita ou de estudante.

Culturalmente, no Brasil, o sistema estrutural viga-pilar em concreto armado ainda é comumente mais utilizado em comparação com outros sistemas e materiais estruturais, possuindo grande variedade de programas nacionais em elementos finitos que trabalham com a norma brasileira NBR 6118:2014 (Projeto de Estruturas de Concreto). Porém, pelo que se pode averiguar, ainda não existe um programa brasileiro que trabalhe satisfatoriamente com estruturas de madeira.

Nesse sentido, algumas universidades buscam preencher essa lacuna. A Universidade de Passo Fundo (UPF), por exemplo, está desenvolvendo um programa educacional gratuito para cálculo de estruturas de madeira chamada JWOOD. A ferramenta é destinada aos estudantes que buscam conhecimentos na área de estruturas, aos professores que desejam utilizar a ferramenta para acompanhar suas aulas e aos profissionais do ramo de projetos e construção (DIVISÃO DE TI, 2015).

Outra iniciativa vem da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), que desenvolveu uma ferramenta computacional gratuita para dimensionamento de estruturas em madeira para telhados residenciais, chamada DiTeMa. (MOURA, R. De S, 2017)

Os programas internacionais encontrados no levantamento, que modelam estruturas em madeira são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Levantamento dos programas internacionais para estruturas de madeira

Software	Norma	Disponibilidade
Dlubal	NBR 7190	Versão estudante
Arkisoft	NBR 7190	Versão de avaliação de 30 dias
Multiplus	NBR 7190	Apenas compra
Tricalc	NBR 7190	Versão de avaliação de 30 dias
Cype	NBR 7190	Versão <i>After Hours</i>
AXIS-VM	EC5	<i>Free Trial</i>
Dietrich	German Code	<i>Freeware</i>
SEMA	Empresa alemã	Versão de avaliação de 30 dias
Timbertech	Empresa italiana	Versão de avaliação de 30 dias
Robot	EC5	Versão estudante
Runet	EC5	Versão de avaliação de 30 dias

A versão *after hours* do Cype é gratuita, mas só pode ser usada entre as 22h00 e as 08h00 nos dias úteis e durante todo o dia aos sábados e domingos.

O programa que melhor atendeu as expectativas do trabalho foi o RFEM, desenvolvido pela empresa alemã DLUBAL Software®. O RFEM é um programa de elementos finitos que faz modelagem, cálculos estáticos e dimensionamento de estruturas de madeira, aço, concreto e outros (vidro, alumínio, solo, etc.). No programa estão implementadas normas de 12 países diferentes (incluindo a brasileira) mais os Eurocódigos. O RFEM é a base de um sistema de *software* composto por módulos, no qual é possível definir a estrutura, os materiais e os carregamentos.

O RFEM disponibiliza versão de estudante ilimitada de um ano, que pode ser renovada e oferece um bom suporte para quem está aprendendo a utilizar a ferramenta, com exercícios introdutórios (Dlubal Software, 2017), manuais em português (Dlubal Software, 2017), vídeos tutoriais (Dlubal Software, Inc. 2017) e suporte via e-mail eficiente.

Para este trabalho, além do RFEM, foi utilizado o módulo RF-Laminate, que efetua análise de deformações e de tensões de laminados, incluindo madeira lamelada colada cruzada. Ele é baseado na Teoria das placas e o modelo dos materiais utilizado é ortotrópico (Manual RF-Laminate, 2016).

2.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA NECESSÁRIAS PARA AS MODELAGENS

Para que fosse possível a modelagem do comportamento estrutural de um painel submetido à flexão, é necessário o conhecimento de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira. Os parâmetros de rigidez, como módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson (ν), influem no deslocamento (δ) do material. Os valores das resistências mecânicas da madeira e de outros materiais, como o aço, impactam no desempenho aos estados limites últimos. A madeira é um material anisotrópico, no entanto de forma simplificada pode ser representada sob a forma de um modelo ortotrópico, com propriedades mecânicas diferenciadas em três direções ortogonais entre si (BODIG e JAYNE, 1982).

2.3.1 Características do material

Uma das formas de se obter o módulo de elasticidade longitudinal de cada tábua ou de um painel é medir por meio de ensaio de flexão à três pontos, utilizando a equação 2.1.

$$E_x = \frac{F.L^3}{48.\delta.I}, \quad (2.1)$$

onde E_x é o módulo de elasticidade longitudinal na flexão em MPa; F é o valor da carga em N; L é a distância teórica entre os apoios em mm; I é o momento de inércia em mm^4 e δ é a flecha no meio do vão em mm.

Na falta dos valores de rigidez necessários para uma análise estrutural, podem-se usar as seguintes relações sugeridas por Bodig e Jayne (1982):

$$E_x : E_y : E_z \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (2.2)$$

$$G_{xy} : G_{xz} : G_{yz} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (2.3)$$

$$E_x : G_{xy} \approx 14 : 1 \quad (2.4)$$

Os autores apresentam ainda o valor médio do coeficiente de poisson ν_{xy} para coníferas de 0,37. A partir da lei de Hooke para materiais ortotrópicos, Bodig e Jayne (1982) chegam na seguinte identidade:

$$-\frac{\nu_{yx}}{E_y} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \quad (2.5)$$

Segundo a norma BS EN 16351:2015, o valor de E_y para painéis de CLT que não são colados nas bordas, como é o caso dos painéis do trabalho, é simplificado para valor nulo.

2.3.2 Resistência do material

A partir do valor da resistência à tração paralela, por meio das relações contidas na NBR 7190:1997, na falta de valores experimentais, podem ser estimados os valores de resistência característica de compressão paralela às fibras, compressão perpendicular às fibras e de cisalhamento, utilizando as seguintes equações:

$$f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k} \quad (2.6)$$

$$f_{c90,k} = 0,25 \cdot f_{c0,k} \quad (2.7)$$

$$f_{v0,k} = 0,15 \cdot f_{c0,k} \text{ (para coníferas)} \quad (2.8)$$

Antes da realização do trabalho, o laboratório já havia obtido o valor médio de 73,8 N/mm² da resistência à tração paralela às fibras do lote. A partir das relações da NBR 7190:1997 foram obtidas as seguintes resistências:

$$f_{c0,m} = 56,8 \text{ N/mm}^2$$

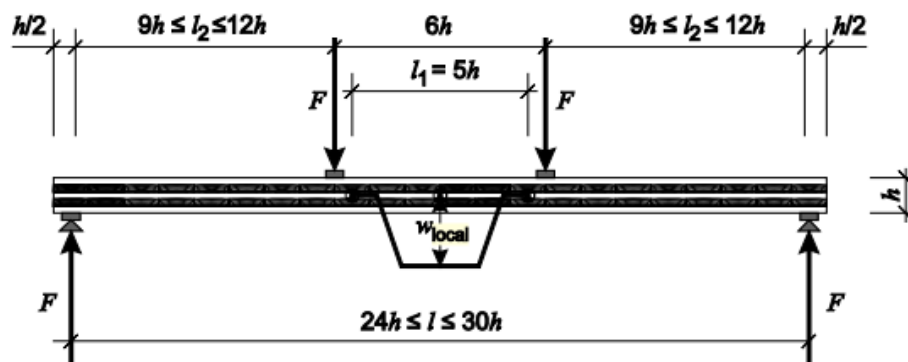
$$f_{c90,m} = 14,2 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,m} = 8,5 \text{ N/mm}^2$$

2.4 ENSAIO DE FLEXÃO PELA NORMA BS EN 16351:2015

Segunda a norma inglesa BS EN 16351:2015, o ensaio de resistência à flexão de painéis de CLT deve respeitar as características mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Teste de flexão de CLT pela norma BS EN 16351:2015



Onde h é a espessura do painel, l é a distância teórica entre os apoios e w_{local} é o deslocamento medido.

2.5 MÉTODOS USADOS PARA MODELAGEM DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PAINÉIS DE CLT

2.5.1 Método da homogeneização da seção

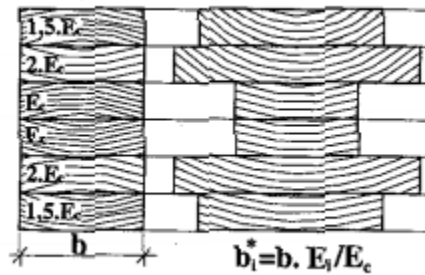
O Método de Homogeneização da Seção (MHS), também conhecido como método da seção transformada, consiste em substituir a seção transversal de uma tábua de material heterogêneo em uma seção equivalente de material homogêneo, chamada de seção transformada. Na formulação que foi usada modifica-se a largura das lâminas na seção transformada e mantêm-se as propriedades mecânicas do material de uma das lâminas, como na referência. Considera-se que as lâminas estão perfeitamente ligadas e despreza-se a espessura da camada de cola (LA ROVERE, 1998).

Ainda segundo La Rovere (1998), para que as seções sejam equivalentes, o momento fletor da estrutura original deve ser igual ao momento fletor da estrutura transformada, isso implica na relação apresentada na equação 2.9:

$$b_i^* = b \frac{E_i}{E_c}, \quad (2.9)$$

onde b_i^* é a largura da lâmina na seção transformada; b é a largura da lâmina na seção original; E_i é o módulo de elasticidade da lâmina que será transformada e E_c é o módulo de elasticidade da lâmina que não será transformada. No exemplo da figura 6 adota-se como referência a 3ª ou a 4ª lâmina de módulo E_c .

Figura 6 – Exemplo de seção original e seção transformada pelo MHS



Fonte: adaptado de La Rovere (1998)

Com a seção transformada, é possível determinar seu novo momento de inércia pelo teorema dos eixos paralelos:

$$I_i = I_0 + A_i(d_i^2), \quad (2.10)$$

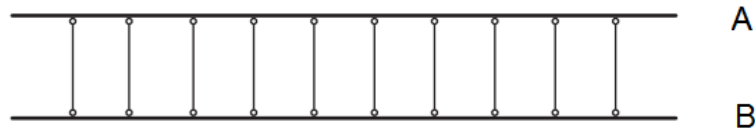
$$I_{total} = \sum_{i=1}^2(I_i), \quad (2.11)$$

onde I_{total} é o momento de inércia total da seção; I_i é o momento de inércia de cada lâmina em relação à linha neutra da viga; I_0 é a inércia da lâmina em relação ao seu próprio eixo; A_i é a área da seção de cada lâmina e d_i é a distância entre a linha neutra da lâmina e a linha neutra da seção transversal.

2.5.2 Método da analogia de cisalhamento (Kreuzinger)

Esse método de cálculo é, de acordo com a Blass e Fellmoser (apud CLT Handbook, 2011), o mais preciso método de cálculo para CLT. Ele é usado para considerar os diferentes módulos de elasticidade e de cisalhamento de cada camada. Nesse método, o efeito das deformações de cisalhamento está incorporado. As características da seção de várias camadas são representadas em duas vigas virtuais A e B. A rigidez da viga A é dada pela soma do momento de inércia das camadas individuais ao longo da linha neutra multiplicada pelo módulo de elasticidade, enquanto a rigidez da viga B é dada pela soma da segunda parcela do teorema dos eixos paralelos (Equação 2.10). Essas duas vigas são acopladas com infinitos “*web members*” com rigidez axial infinita (indeformáveis), assim o deslocamento relativo entre a viga A e B é nulo. O resultado final de rigidez para toda seção transversal pode ser obtido com a sobreposição do momento fletor de flexão e dos esforços de cisalhamento das duas vigas.

Figura 7 - Separação das vigas usando o método da analogia de cisalhamento



Fonte: CLT Handbook (2013)

À viga A, é atribuída a rigidez à flexão igual à soma das rigidezes de flexão de todas as camadas individuais como mostra a equação 2.12.

$$B_A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12}, \quad (2.12)$$

onde $B_A = (EI)_A$; E_i é o módulo de elasticidade longitudinal na flexão da camada individual; I_i é o momento de inércia da camada individual; b_i é a largura da camada individual e h_i é a espessura da camada individual.

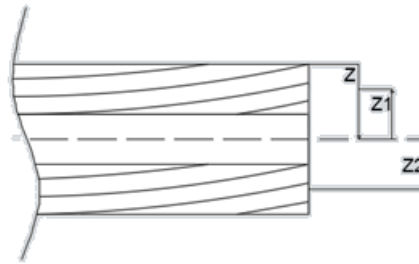
A rigidez ao cisalhamento da viga B é calculada usando o Teorema dos eixos paralelos.

$$B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot Z_i^2, \quad (2.13)$$

onde B_B é $(EI)_B$; E_i é o módulo de elasticidade longitudinal na flexão da camada individual; Z_i é a distância entre o ponto central de cada camada e a linha neutra e A_i é a área da seção transversal da camada individual. A posição da linha neutra é dada pela equação 2.14. A Figura 8 ilustra as distâncias Z_i e Z .

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i A_i) \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n (E_i A_i)} \quad (2.14)$$

Figura 8 - Esquema ilustrando as distâncias Z e Z_i , com $i=1$ e $i=2$



A rigidez à flexão efetiva pode ser obtida usando a equação 2.16.

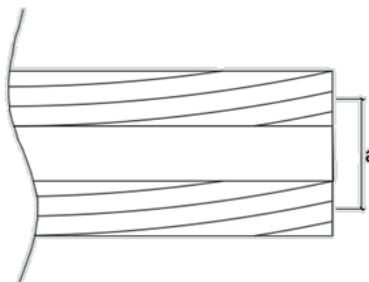
$$(EI)_{eff} = B_A + B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (2.16)$$

E a rigidez de cisalhamento efetiva pode ser obtida usando a equação 2.17.

$$(GA)_{eff} = \frac{a^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b} \right) \right]} \quad (2.17)$$

Onde a é a distância entre o ponto central da primeira camada até o ponto central da última, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Ilustração da distância a



Diferente do EI, a expressão para estimar a rigidez ao cisalhamento GA considera que todas as camadas apresentem o mesmo módulo de elasticidade. Portanto, para aplicá-la foi utilizado o método da homogeneização da seção, apresentado na seção 2.5.1, que consiste em substituir a seção transversal de uma peça com diferentes módulos de elasticidade, em uma seção equivalente com só um valor de módulo de elasticidade. A Figura 10 mostra a seção transformada de um dos painéis.

Figura 10 - Seção transformada para obtenção do módulo de cisalhamento



Para obter o deslocamento dos painéis, pode-se usar o teorema de trabalhos virtuais aplicado aos corpos elásticos. Pelo teorema, o trabalho virtual das forças externas é igual ao trabalho virtual das forças internas, para quaisquer deslocamentos virtuais compatíveis com os vínculos de estrutura (Sussekind, 1980). Sendo o trabalho virtual das forças externas igual à equação 2.18:

$$W_{ext} = \bar{P}\delta \quad (2.18)$$

Onde W_{ext} é o trabalho virtual das forças externas, P a força e δ o deslocamento.

O trabalho virtual das forças internas será igual à soma dos trabalhos virtuais de deformação de todos os elementos de comprimento ds ao longo da estrutura. Considerando a hipótese de regime elástico linear, pode-se aplicar o princípio da superposição de efeitos, que permite deduzir que o trabalho virtual das forças internas é a soma dos trabalhos virtuais de deformação devidos a cada um dos esforços simples atuantes na estrutura, como apresenta a equação 2.19.

$$W_{int} = \int_l \frac{\bar{M}Mds}{EI} + \int_l \frac{\bar{T}Tds}{GJ} + \int_l \frac{\bar{N}Nds}{ES} + \int_l \frac{\bar{Q}\chi Qds}{GA} \quad (2.19)$$

Admitindo que o erro introduzido pelo desprezo das parcelas de torção e de esforços normais à seção seja tolerável, uma vez que os painéis de CLT trabalham fundamentalmente aos esforços de momento fletor e de esforço cortante (Sussekind, 1980).

Dessa forma, o deslocamento máximo no meio do vão de um painel de CLT, para uma carga concentrada no meio do vão pode ser calculado pela equação 2.15:

$$u_{max} = \frac{1}{48} \cdot \frac{PL^3}{(EI)_{eff}} + \frac{1}{4} \cdot \frac{PL}{(GA)/\kappa}, \quad (2.20)$$

onde κ é o coeficiente de fator de forma no cisalhamento.

De forma simplificada, apesar da seção transformada não ser exatamente retangular, foi utilizando o κ para seções retangulares, igual a 1,2 (CLT Handbook, 2013).

2.5.3 Resistência à flexão

De acordo com a teoria das vigas ligadas mecanicamente (*mechanically jointed beams theory*), apresentado no anexo B do Eurocode 5 (EN 1995:2004), a tensão máxima de flexão em um painel pode ser obtida pela Equação 2.18.

$$\sigma_{max} = \sigma_{global} + \sigma_{local}, \quad (2.21)$$

Onde σ_{global} é a tensão axial na camada externa devido à flexão, enquanto σ_{local} é a tensão na camada exterior em consequência da flexão nessa camada. As tensões global e local podem ser calculadas utilizando as equações 2.22 e 2.23.

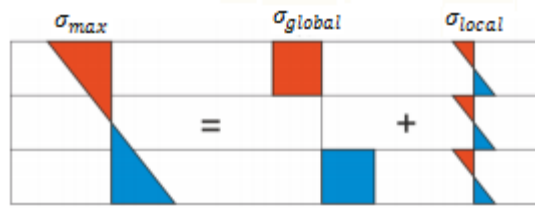
$$\sigma_{global} = M \cdot z_i \cdot \frac{E_i}{(EI)_{eff}}, \quad (2.22)$$

$$\sigma_{local} = M \cdot 0,5h_i \cdot \frac{E_i}{(EI)_{eff}}, \quad (2.23)$$

onde M é o momento fletor aplicado, z_i é a distância entre o ponto central de cada camada e a linha neutra, h_i é a espessura de cada camada, E_i é o E_x de cada camada e EI_{eff} é a rigidez à flexão efetiva determinada pela equação 2.16.

A Figura 11 mostra como é elaborado o gráfico da tensão máxima.

Figura 11 - Tensão axial devida à parcela de tração/compressão e a parcela de flexão



Fonte: RF-Laminate Manual, 2016

A verificação da tensão no estado limite último é feita da seguinte maneira (CLT Handbook, 2013):

$$\frac{\sigma_{global}}{f_{t/c,0}} + \frac{\sigma_{local}}{f_M} \leq 1, \quad (2.24)$$

Onde $f_{t/c,0}$ é a resistência à tração ou compressão paralela às fibras, dependendo do sentido da solicitação existente na camada, e f_M é a resistência à flexão.

2.5.4 Método dos elementos finitos

Uma estrutura pode ser discretizada, sob forma simplificada, como um conjunto de elementos estruturais interconectados em um número finito de nós. Se as relações força deslocamento, para cada um dos elementos, são conhecidas, é possível determinar as propriedades mecânicas dos mesmos e estudar o comportamento da estrutura de forma global. Para um meio contínuo, o número de nós de conexão é infinito, o que dificulta uma solução numérica. O conceito de elementos finitos visa contornar esta dificuldade, considerando que o meio contínuo está dividido em subdomínios, denominados elementos, que estão interconectados em um número finito de nós. Nestes nós, atuam forças representativas das tensões no contorno do elemento. Este esquema permite a redução de problemas do meio contínuo, em geral governados por equações diferenciais e condições de contorno, à solução de um número finito de equações algébricas (D'Ávila, V. M. R. 2005).

Na análise de painéis de CLT, pelo fato de estarem submetidos principalmente à solicitações de momento fletor e de cisalhamento, faz sentido aplicar um modelo de comportamento de placas. O método dos elementos finitos analisa os elementos de placa utilizando a teoria de placas de flexão. A solução de problemas de placas pode ser genericamente dividida em dois grandes grupos: o baseado na teoria de Kirchhoff e o baseado na teoria de Mindlin. A principal diferença entre as duas teorias é que a teoria de Mindlin

considera a deformação associada ao esforço de corte. Pela teoria de Kirchhoff, não há giro na seção para a placa deformada. Já na teoria de Mindlin, a seção inicialmente plana e perpendicular à superfície média, após a deformação permanece plana, mas não mais perpendicular à superfície média (Milani, A. C. 2006). No caso do elemento de placa utilizado no módulo RF-Laminate do Dlubal RFEM, a teoria aplicada é a de Mindlin.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão apresentadas as etapas percorridas para que se obtivessem os resultados esperados no trabalho. Inicialmente, para melhor domínio dos métodos de análise, foi analisado, experimentalmente e analiticamente, um corpo de prova lamelado de madeira, constituído por duas tábuas sobrepostas. É o que está descrito na seção 3.1. Na seção 3.2 está descrita a etapa de análise experimental dos painéis de CLT e na seção 3.3, a modelagem numérica destes painéis.

3.1 TESTE PRELIMINAR

Foi realizado um teste em laboratório no CAV para comparação de resultados de deslocamentos medidos e previstos para estruturas lameladas. Esta etapa teve como objetivo desenvolver confiança no uso do programa para o desenvolvimento do trabalho.

O método do teste realizado foi medir o deslocamento máximo de um lamelado de madeira, constituído por duas tábuas sobrepostas, submetido a uma carga de flexão. O deslocamento foi (a) medido durante ensaio de flexão em três pontos; (b) estimado pela mecânica dos sólidos, utilizando o método da homogeneização da seção (seção 2.5.1); e (c) estimado pelo método dos elementos finitos, com a modelagem no programa selecionado no início do trabalho.

A medição do deslocamento máximo do corpo de prova foi realizada em dois momentos, antes e depois da colagem das tábuas sobrepostas, para averiguar a influência da ligação colada.

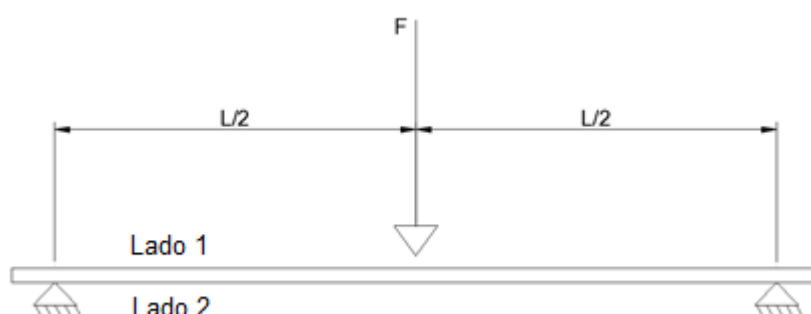
3.1.1 Caracterização e preparação do corpo de prova para o teste preliminar

O corpo de prova utilizado foi constituído por duas tábuas (A e B) coladas longitudinalmente entre si, nas maiores faces. As tábuas apresentavam inicialmente largura de 19,8 cm e espessura de 1,98 cm e comprimento de 280 cm. O vão teórico escolhido foi de 250 cm. Primeiramente, mediu-se o deslocamento de cada tábua individualmente e calculou-se o módulo de elasticidade na flexão de cada uma, utilizando a equação 2.1.

O ensaio realizado foi de flexão a três pontos (adaptado da NBR 7190:1997), com as tábuas submetidas a cargas verticais no meio da vão. Seus deslocamentos máximos foram medidos com transdutores posicionados no meio do vão (Figura 12). Os módulos de elasticidade na flexão foram calculados a partir dos deslocamentos medidos para três valores de carregamento diferentes (21,1 N; 51,7 N e 97,9 N), posicionando as faces superior e

inferior da tábua alternadamente. Posteriormente, foi calculada a média dos seis deslocamentos medidos para cada tábua.

Figura 12 - Esquema estático do ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade das tábuas



Depois de obtidos os módulos de elasticidade para as tábuas não coladas entre si, as peças foram plainadas e, logo em seguida, aplicada a cola e prensadas.

O corpo de prova, após colado, foi novamente submetido ao ensaio de flexão a três pontos, com mesma distância teórica entre os apoios de 250 cm. Mediram-se os deslocamentos máximos, com transdutor posicionado no meio do vão, para três valores de carregamentos diferentes.

3.1.2 Módulo de elasticidade do corpo de prova

Os valores de geometria, de carregamentos, de deslocamentos medidos e de módulo de elasticidade longitudinal das duas tábuas sobrepostas do teste preliminar, estão representados no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores de geometria, de carregamentos aplicados, de deslocamentos medidos de E_x das tábuas utilizadas no teste preliminar.

Lado	h (mm)	b (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)			I (mm ⁴)	E (MPa)			E médio (MPa)
				21,1 N	51,7 N	97,9 N		21,1 N	51,7 N	97,9 N	
A1	19,80	198,00	2500	3,36	8,06	14,27	128079,47	159784,2	163045,4	174387,7	160374,23
A2				3,47	8,16	15,72		154588,6	160964,2	158235,9	
B1	19,90	198,00	2500	4,12	9,99	19,90	130029,88	128110,2	129593,3	123158,7	124680,71
B2				4,47	10,38	19,67		118118,1	124737,3	124624,2	

3.1.3 Ensaio de flexão do corpo de prova

Os resultados dos deslocamentos máximos obtidos no ensaio de flexão do corpo de prova, com as tábuas antes e depois de coladas, estão indicados, para cada valor de carregamento, no Quadro 4.

Quadro 4 – Deslocamentos medidos no ensaio de flexão do conjunto de duas tábuas do teste preliminar

Força (N)	21,1 N	51,7 N	97,8 N
δ tábuas soltas (mm)	2,01	4,75	8,84
δ tábuas coladas (mm)	0,90	2,17	4,13

A diferença dos valores de deslocamento das tábuas coladas e soltas é de aproximadamente 120%, isso demonstra a grande contribuição da ligação colada para a rigidez do conjunto.

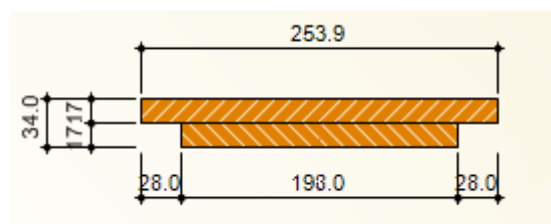
3.1.4 Modelagem analítica do corpo de prova e comparação

Nesta etapa, os deslocamentos do conjunto de duas tábuas foram estimados pelo Método da Homogeneização da Seção e pelo Método dos Elementos Finitos. Após, os deslocamentos estimados foram comparados aos valores obtidos experimentalmente.

No corpo de prova de largura aproximada de 19,8 mm, as lâminas superior e inferior possuem módulo de elasticidade longitudinal à flexão médio de 16029,8 MPa e de 12499,4 MPa, respectivamente. Utilizando a equação 2.9, chegou-se à seção transformada do corpo de prova representada na Figura 13:

$$b_i^* = 19,8 \frac{16029,8}{12499,4} = 25,4 \text{ mm}$$

Figura 13 – Dimensões da seção transversal da seção transformada em mm.



Com a seção transformada da Figura 13, foi determinado o novo valor de momento de inércia com as equações 2.10 e 2.11. O momento de inércia total da seção transformada obtido foi $I_{\text{total}} = 731568,4 \text{ mm}^4$.

Os valores de deslocamento obtidos pelo MHS, para cada valor de carregamento, utilizando a equação 2.1, são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Deslocamentos estimados pelo MHS com os dados do teste preliminar

Força (N)	21,1 N	51,7 N	97,8 N
Deslocamento (mm)	0,90	2,21	4,18

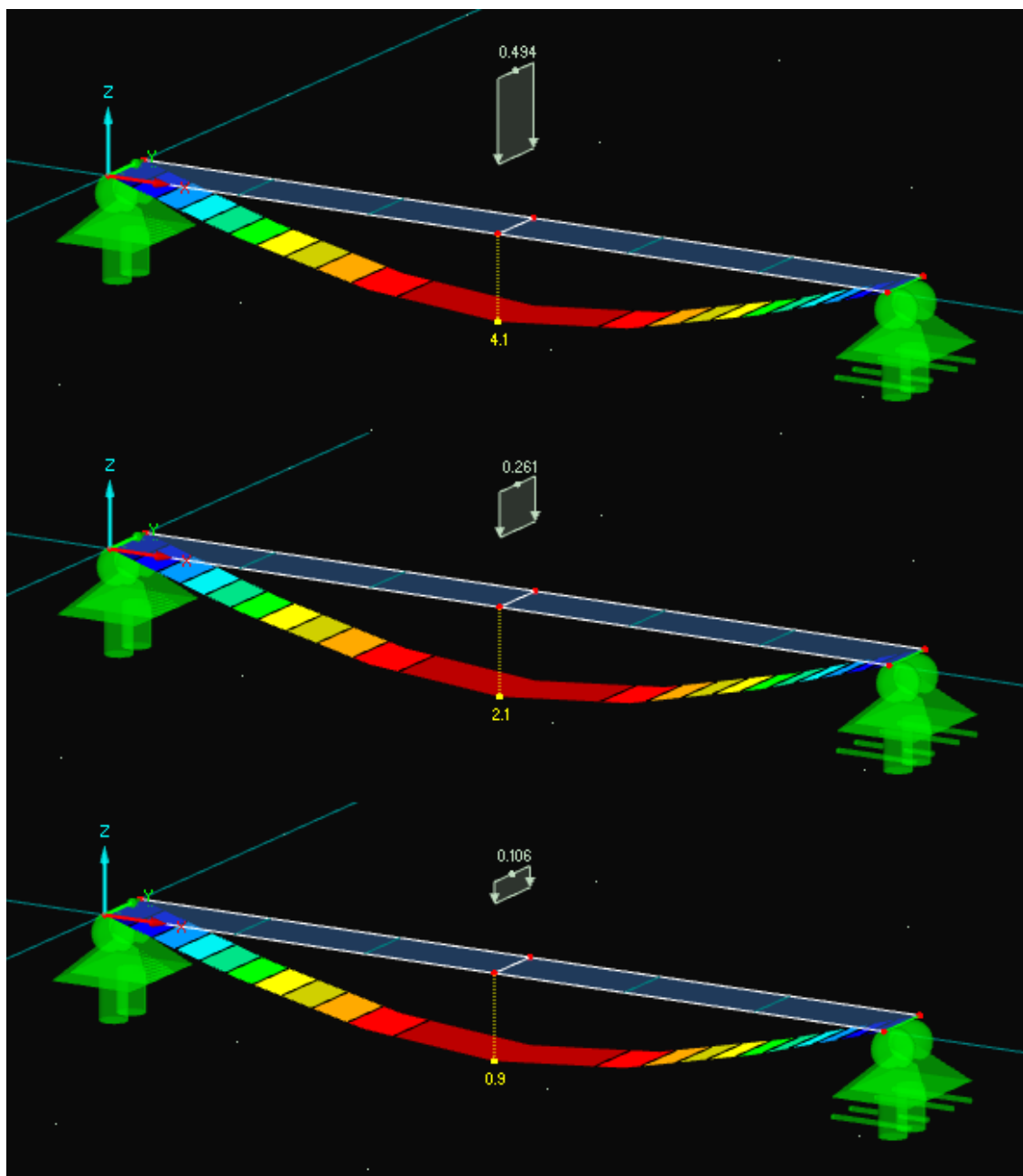
As mesmas dimensões de 19,8 cm de largura e 250 cm de distância teórica entre os apoios foram inseridas no módulo RF-Laminate do programa RFEM. As cargas de 21,1 N, 51,7 N e 97,8 N foram transformadas para cargas distribuídas ao longo da largura do painel de 198 mm. Os valores de carga distribuída aplicada são apresentados no Quadro 6:

Quadro 6 - Transformação da carga pontual para carga distribuída ao longo de 198 mm

P (N)	P (N/mm)
21,1	0,106
51,7	0,261
97,8	0,494

A figura 14 mostra a representação de saída dos valores de deslocamento obtidos pelo programa, para cada um dos três carregamentos aplicados.

Figura 14 - Resultados de deslocamentos em mm da modelagem em elementos finitos do corpo de prova do teste preliminar



Como pode ser observado no Quadro 7, os valores de deslocamentos obtidos pelo ensaio foram próximos aos valores estimados pelas modelagens analíticas e numéricas, com diferença máxima de 4,8% entre o ensaio e o MEF para carga de 51,7 N. Dessa forma, com o teste preliminar foi possível considerar suficientemente dominada a utilização do programa RFEM e o MHS pelo autor, para posteriormente analisar e prever o comportamento estrutural dos painéis fabricados no CAV.

Quadro 7 - Deslocamentos obtidos pelo ensaio, MHS e MEF para o corpo de prova do teste preliminar

	Deslocamento (mm)		
	21,1 N	51,7 N	97,8 N
Ensaio	0,90	2,17	4,13
MHS	0,90	2,21	4,18
RFEM	0,90	2,10	4,10
Diferença máxima	0,2%	4,8%	1,8%

3.2 PARTE EXPERIMENTAL

Os valores experimentais utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de painéis de CLT fabricados no CAV, no Laboratório de Materiais e Construções, com madeira serrada de *Pinus taeda*. Antes da montagem, foram realizadas análises de rigidez à flexão das tábuas de madeira que compõem os painéis. O processo de fabricação e de ensaios dos painéis está descrito a seguir.

3.2.1 Madeira

As tábuas de madeira utilizadas na confecção dos painéis de CLT são da espécie *Pinus taeda*, provenientes de plantios com 15 anos de idade, localizados na cidade de Capão Alto (SC), disponibilizadas ao CAV por meio de parceria com a RIGHEZ Madeiras Ltda.

As tábuas apresentavam umidade média de 17% medida por meio de um higrômetro, densidade aparente de 510 kg/m³ e dimensões médias de 20 mm de espessura, 200 mm de largura e 3000 mm de comprimento. As peças foram classificadas visualmente na serraria, onde as tábuas com muitos nós e defeitos foram descartadas.

Para o trabalho foram utilizadas 75 tábuas na produção de 5 painéis de CLT.

3.2.2 Módulo de elasticidade das tábuas

O módulo de elasticidade longitudinal na flexão das tábuas foi estimado previamente por meio do ensaio de flexão a três pontos, da mesma forma que se obtiveram os E_x das tábuas do teste preliminar (seção 3.1.1).

Cada tábua foi submetida às cargas de 21 N, 51,7 N e 97,9 N, para duas posições diferentes da maior dimensão da seção transversal (face superior e face inferior). Para cada valor de carga, foi medido seu deslocamento na face inferior junto ao ponto de aplicação da força. Para isso foram utilizados 2 transdutores de deslocamento de WA 50 mm e o software da HBM “catman easy”.

O módulo de elasticidade longitudinal na flexão atribuído a cada tábua foi determinado a partir do valor médio dos módulos obtidos nos três carregamentos, utilizando a equação 2.1. Na figura 15 é possível visualizar uma tábua durante o ensaio de determinação do módulo de elasticidade realizado.

Figura 15 - Ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade com carregamento de 21 N



3.2.3 Características do painel

Uma vez obtidas as características das tábuas selecionadas, os painéis de CLT foram projetados com 3 camadas de 15 mm de espessura, totalizando 45 mm de espessura do painel, 1000 mm de largura e 2800 mm de comprimento. As camadas de tábuas de madeira serrada estão dispostas de forma cruzada, com 90° na direção longitudinal de camadas adjacentes, e foram coladas com adesivo de poliuretano nas superfícies de contato entre as faces inferior e superior.

Cada uma das camadas superior e inferior possuem 5 tábuas lado a lado, com dimensões de 15 mm de espessura, 200 mm de largura e 2800 mm de comprimento.

A camada intermediária é composta por 14 tábuas, com 15 mm de espessura, 200 mm de largura e 1000 mm de espessura. Para formar esta camada foram utilizadas 5 tábuas do

lote, com comprimento original de 3000 mm, e serradas com 1000 mm de comprimento. A espessura final do painel apresentou 47 mm, devido à espessura de 1 mm das linhas de cola.

As dimensões dos painéis são apresentadas na Figura 16 e a Figura 17 mostra um painel produzido no CAV.

Figura 16 - Dimensões dos painéis

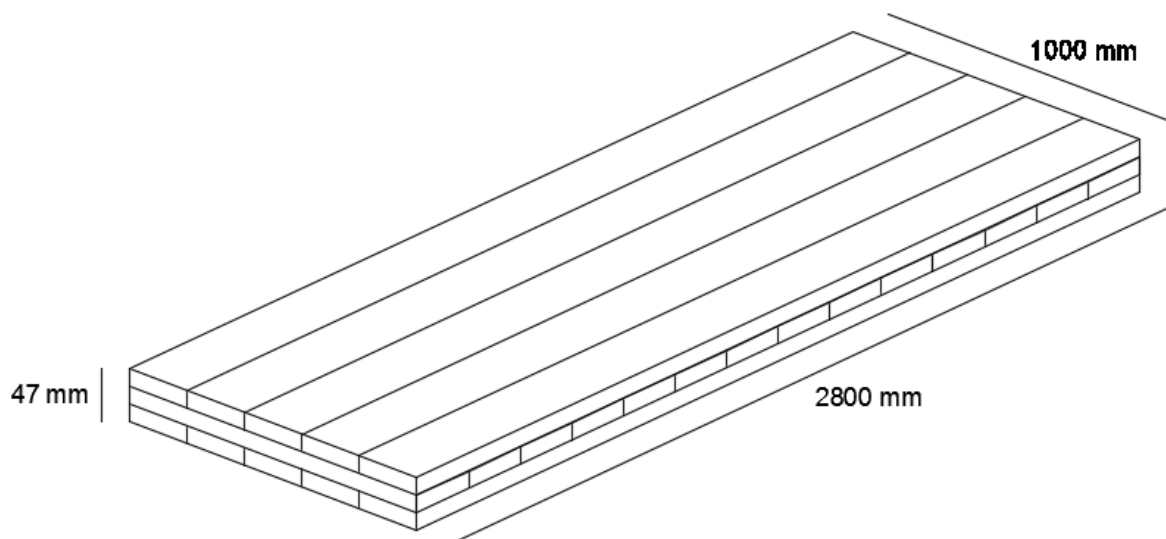
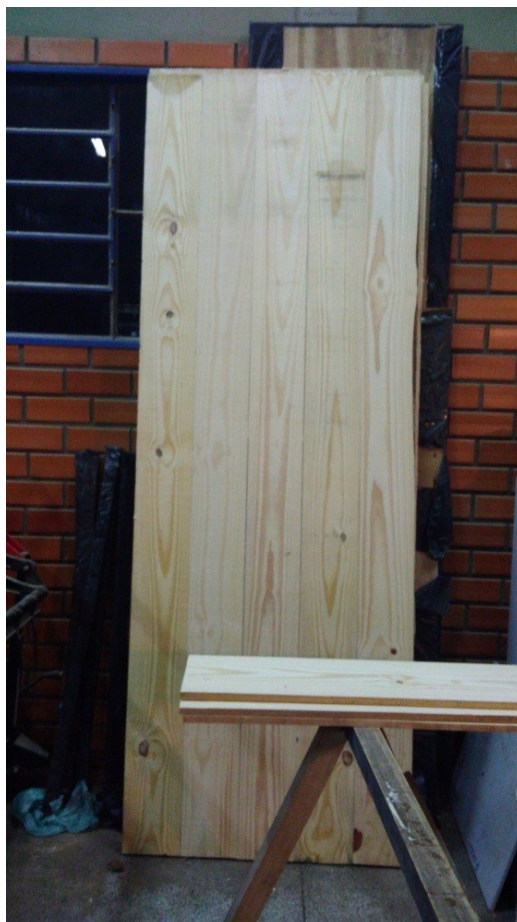


Figura 17 - Painel de CLT produzido no CAV



3.2.4 Seleção das tábuas para a confecção dos painéis

A metodologia escolhida para posicionar as tábuas em cada painel foi feita a partir do valor do módulo de elasticidade longitudinal na flexão de cada tábua. Visando melhor aproveitamento das tábuas, decidiu-se utilizar as tábuas de maior E_x do lote nas camadas periféricas, pois segundo Bodig e Jayne (1982), as melhores lâminas devem ser posicionadas no terço superior e inferior das vigas (regiões de maior esforço na flexão) e as de menor qualidade no terço interior. Com o E_x das tábuas ordenados de forma decrescente, optou-se por selecionar as 10 tábuas de maior E_x do lote com as 5 tábuas de menor E_x para fabricar o primeiro painel, e assim sucessivamente. No Quadro 8 são apresentadas quais tábuas foram utilizadas para compor cada painel por meio de cores. É importante notar que o valor de E_x das tábuas externas vai decrescendo do Painel 1 ao Painel 5.

Quadro 8 – Lista das tábuas ordenadas pelo módulo de elasticidade longitudinal na flexão.

Peça	E _x (MPa)	Peça	E _x (MPa)	Peça	E _x (MPa)	Peça	E _x (MPa)
29	17887,0	18	10939,4	61	9401,2	27	7595,2
14	16750,8	22	10776,3	40	9236,2	15	7528,0
70	16158,0	2	10764,4	58	9079,5	57	7414,9
11	14116,7	53	10763,1	42	9062,3	32	7320,0
51	14060,3	69	10694,1	64	9037,7	73	7311,6
4	12960,5	67	10681,5	20	9032,7	41	7243,1
75	12723,7	19	10596,3	3	9020,2	8	7229,7
10	12382,8	68	10477,9	62	8973,4	12	7161,0
60	12359,9	16	10446,5	23	8545,8	25	6797,1
21	12340,8	78	10305,2	50	8222,5	26	6730,7
7	12223,4	59	9950,7	74	8195,2	37	6485,1
48	11726,6	65	9912,5	72	8115,2	34	6389,2
79	11447,2	55	9886,2	76	8054,3	43	6173,0
5	11284,5	63	9862,0	71	8028,7	9	6121,7
39	11121,1	33	9819,3	45	8010,0	28	6039,4
56	11105,3	31	9756,1	52	7907,5	6	6015,9
35	11054,8	49	9741,0	13	7650,6	38	5966,1
36	11051,4	1	9608,2	30	7645,4	44	5760,3
47	10979,1	66	9559,2	17	7633,6	24	5402,6
54	10973,3	77	9407,4			46	5372,3

Legenda:

	Tábuas utilizadas no Painel 1		Tábuas utilizadas no Painel 4
	Tábuas utilizadas no Painel 2		Tábuas utilizadas no Painel 5
	Tábuas utilizadas no Painel 3		Tábuas não utilizadas

Das 10 tábuas de maior módulo de elasticidade de cada painel, 5 foram utilizadas na camada superior e 5 na camada inferior. Na busca de maior uniformidade nas propriedades mecânicas entre os painéis, distribuíram-se as tábuas de maneira subsequente na montagem do painel. As 5 tábuas de menor rigidez foram serradas com 100 cm de comprimento e dispostas em ordem alternada na camada intermediária. Para exemplificar, na Figura 18 é possível observar como foram distribuídas as tábuas do painel 1.

o tempo de prensagem para 20 °C é de 24 horas segundo a ficha técnica (Ficha Técnica Kleiberit® 501, 2017). A figura 19 mostra a aplicação de cola num dos painéis.

Figura 19 - Aplicação de cola num painel



Para aplicar pressão de colagem, foi utilizada uma prensa manual com pressão de 6 MPa, por meio de 12 barras com distância de 25 cm entre si, como mostra a Figura 20. As barras distribuem a força de prensagem na forma mais uniforme possível sobre o painel. As laterais foram prensadas por meio de cintas de amarração tensionadas com catracas. A pressão de colagem foi mantida por 24 horas.

Figura 20 – Prensagem do painel



3.2.6 Ensaio de flexão nos painéis

Para avaliar a rigidez dos painéis, foram realizados ensaios de flexão com cargas aplicadas conhecidas e valores de deslocamentos medidos. O ensaio foi feito de forma não destrutiva, no regime elástico, para permitir futura caracterização da resistência menânica. Devido a isso foi possível realizar o ensaio nos dois lados dos painéis, identificados como lados A e B.

A distância teórica entre os apoios escolhida foi de 2,2 m e a carga máxima foi de 3 kN distribuída ao longo da largura no meio do vão. Os painéis estavam apoiados em peças de madeira de Angelim pedra (*Hymenolobim petraeum Ducke*) de seção retangular. Para efeito de comportamento estrutural, os vínculos foram considerados articulados.

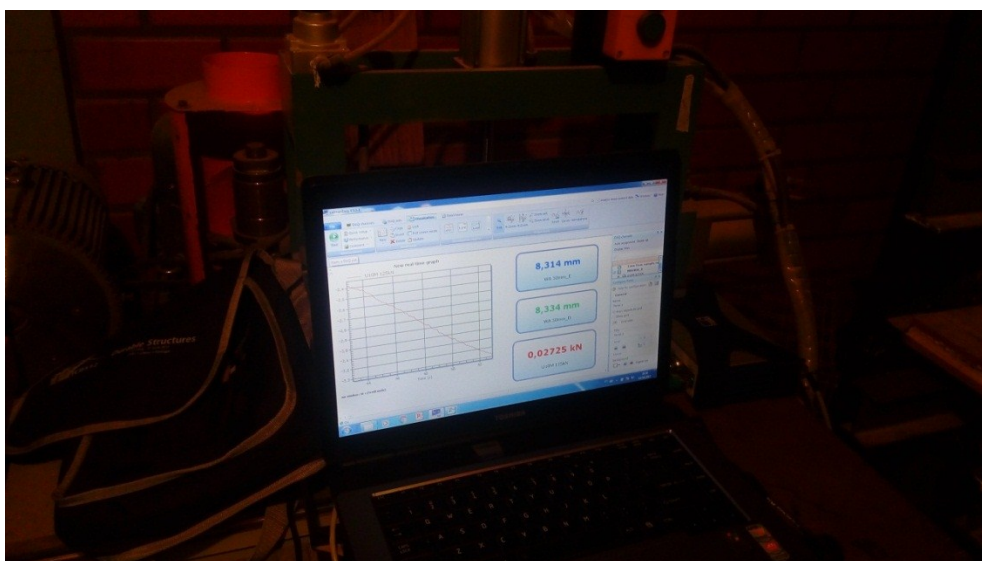
Na figura 21 é possível observar o sistema de aplicação de força preparado para o ensaio. Ele consiste em um cutelo de Angelim pedra, com dimensões de 4 cm x 16 cm x 110 cm, para distribuir o carregamento em uma maior superfície de contato com os painéis; outra peça de Angelim pedra, com dimensões de 4,5 cm x 16 cm x 40 cm, foi acoplada ao cutelo para apoiar a célula de carga; uma célula de carga U10M/5kN para medição da carga aplicada e um macaco hidráulico com capacidade de 15000 kN.

Figura 21 - Ensaio de flexão do painel.



Como esse sistema de aplicação de carga não estava suspenso e sim apoiado no próprio painel que seria ensaiado, foi considerada uma carga inicial de 190 N, que é o peso do sistema. Para medição do deslocamento foram utilizados dois transdutores de deslocamento de WA 50 mm, no centro dos lados do painel. O programa de aquisição de dados utilizado para registrar a leitura dos transdutores de deslocamento e da célula de carga foi o HBM catman easy (Figura 22).

Figura 22 - Imagem do monitor durante uso do programa HBM Catman Easy para leitura da carga e do deslocamento durante o ensaio de flexão.



Para aumentar o valor do carregamento aplicado, o macaco hidráulico era acionado manualmente, empurrando o cutelo em direção ao painel, pois estava impedido de deslocar

para cima pela prensa. A velocidade de aplicação de força foi de aproximadamente 10 mm/min, controlada pela observação do gráfico de força x deslocamento no monitor.

Os gráficos do tipo força por deslocamento dos painéis podem ser observados no Apêndice A.

3.3 MODELAGEM NUMÉRICA DO PAINEL

A modelagem numérica do trabalho está dividida em duas partes. A primeira parte, estima valores de deslocamentos, com modelagens do ensaio realizado em laboratório, com carga no meio do vão de 3 kN. A segunda parte estima a carga máxima suportada pelo painel considerando a resistência à flexão, com base nas tensões teóricas máximas dos painéis. Para esta etapa, levou-se em consideração as exigências da norma BS EN 16351:2015 para ensaios de resistência à flexão de painéis de CLT.

Como dito na seção 3.2.3, apesar das tábuas apresentarem espessura de 15 mm, a espessura total do painel foi de aproximadamente 47 mm devido às linhas de cola. Dessa forma, foi utilizada nas modelagens numéricas a espessura de 15,7 mm para cada camada, que foi obtida dividindo a espessura total do painel de 47 mm pelo número de camadas igual a 3.

3.3.1 Propriedades da madeira utilizadas nas modelagens

Os valores das características mecânicas das tábuas, utilizadas nas modelagens dos painéis, são exibidos em ordem decrescente no Quadro 9.

Quadro 9 - Valores das características mecânicas das tábuas

Peça	Ex (MPa)	Ey (MPa)	GLR (MPa)	GRT (MPa)	GLT (MPa)	vxy	vyx
29	17782,75	0	1270,20	127,02	1193,98	0,37	0
14	16353,47	0	1168,11	116,81	1098,02	0,37	0
70	16239,12	0	1159,94	115,99	1090,34	0,37	0
11	14117,21	0	1008,37	100,84	947,87	0,37	0
51	14075,50	0	1005,39	100,54	945,07	0,37	0
4	13199,48	0	942,82	94,28	886,25	0,37	0
75	12751,80	0	910,84	91,08	856,19	0,37	0
10	12364,85	0	883,20	88,32	830,21	0,37	0
21	12362,84	0	883,06	88,31	830,08	0,37	0
60	12265,63	0	876,12	87,61	823,55	0,37	0
7	12249,82	0	874,99	87,50	822,49	0,37	0
48	11747,17	0	839,08	83,91	788,74	0,37	0
36	11484,51	0	820,32	82,03	771,10	0,37	0
79	11247,43	0	803,39	80,34	755,18	0,37	0

Peça	Ex (MPa)	Ey (MPa)	GLR (MPa)	GRT (MPa)	GLT (MPa)	vxy	vyx
56	11090,21	0	792,16	79,22	744,63	0,37	0
53	11045,24	0	788,95	78,89	741,61	0,37	0
5	11018,94	0	787,07	78,71	739,84	0,37	0
54	10998,66	0	785,62	78,56	738,48	0,37	0
39	10987,78	0	784,84	78,48	737,75	0,37	0
16	10933,10	0	780,94	78,09	734,08	0,37	0
35	10871,13	0	776,51	77,65	729,92	0,37	0
47	10787,90	0	770,56	77,06	724,33	0,37	0
69	10693,89	0	763,85	76,38	718,02	0,37	0
18	10670,16	0	762,15	76,22	716,42	0,37	0
22	10665,32	0	761,81	76,18	716,10	0,37	0
2	10631,65	0	759,40	75,94	713,84	0,37	0
67	10570,55	0	755,04	75,50	709,74	0,37	0
68	10502,44	0	750,17	75,02	705,16	0,37	0
19	10430,26	0	745,02	74,50	700,32	0,37	0
78	10253,77	0	732,41	73,24	688,47	0,37	0
65	10207,32	0	729,09	72,91	685,35	0,37	0
59	10191,24	0	727,95	72,79	684,27	0,37	0
55	9926,75	0	709,05	70,91	666,51	0,37	0
63	9899,43	0	707,10	70,71	664,68	0,37	0
49	9886,78	0	706,20	70,62	663,83	0,37	0
31	9811,87	0	700,85	70,08	658,80	0,37	0
33	9764,14	0	697,44	69,74	655,59	0,37	0
77	9716,89	0	694,06	69,41	652,42	0,37	0
61	9644,47	0	688,89	68,89	647,56	0,37	0
1	9631,38	0	687,96	68,80	646,68	0,37	0
66	9596,62	0	685,47	68,55	644,34	0,37	0
40	9281,43	0	662,96	66,30	623,18	0,37	0
58	9185,25	0	656,09	65,61	616,72	0,37	0
42	9030,08	0	645,01	64,50	606,31	0,37	0
20	9009,36	0	643,53	64,35	604,91	0,37	0
62	8939,60	0	638,54	63,85	600,23	0,37	0
64	8931,12	0	637,94	63,79	599,66	0,37	0
3	8768,46	0	626,32	62,63	588,74	0,37	0
23	8526,43	0	609,03	60,90	572,49	0,37	0
50	8317,11	0	594,08	59,41	558,43	0,37	0
74	8266,39	0	590,46	59,05	555,03	0,37	0
52	8173,63	0	583,83	58,38	548,80	0,37	0
72	8084,34	0	577,45	57,75	542,81	0,37	0
76	8033,97	0	573,85	57,39	539,42	0,37	0
45	8031,44	0	573,67	57,37	539,25	0,37	0
71	7930,17	0	566,44	56,64	532,45	0,37	0
27	7711,62	0	550,83	55,08	517,78	0,37	0
13	7679,34	0	548,52	54,85	515,61	0,37	0

Peça	Ex (MPa)	Ey (MPa)	GLR (MPa)	GRT (MPa)	GLT (MPa)	vxy	vyx
30	7594,21	0	542,44	54,24	509,90	0,37	0
57	7518,83	0	537,06	53,71	504,84	0,37	0
17	7510,65	0	536,48	53,65	504,29	0,37	0
32	7431,08	0	530,79	53,08	498,94	0,37	0
15	7321,79	0	522,99	52,30	491,61	0,37	0
41	7228,58	0	516,33	51,63	485,35	0,37	0
8	7166,64	0	511,90	51,19	481,19	0,37	0
73	7128,63	0	509,19	50,92	478,64	0,37	0
12	6732,12	0	480,87	48,09	452,01	0,37	0
34	6692,28	0	478,02	47,80	449,34	0,37	0
25	6677,68	0	476,98	47,70	448,36	0,37	0
37	6417,16	0	458,37	45,84	430,87	0,37	0
9	6411,74	0	457,98	45,80	430,50	0,37	0
26	6303,87	0	450,28	45,03	423,26	0,37	0
43	6182,03	0	441,57	44,16	415,08	0,37	0
6	6045,64	0	431,83	43,18	405,92	0,37	0
28	6038,90	0	431,35	43,14	405,47	0,37	0
38	5995,91	0	428,28	42,83	402,58	0,37	0
44	5436,17	0	388,30	38,83	365,00	0,37	0
24	5322,58	0	380,18	38,02	357,37	0,37	0
46	5146,80	0	367,63	36,76	345,57	0,37	0

Diferente dos valores das características de rigidez das tábuas, os valores de resistência da madeira não foram medidos individualmente. São considerados valores médios para o lote inteiro, e não para cada tábua. No Quadro 10, estão os valores de resistências utilizadas nas modelagens analíticas.

O valor experimental da resistência na flexão foi obtido seguindo os procedimentos para determinação da resistência convencional à flexão, recomendados pela NBR 7190:1997. Foram ensaiadas 6 amostras, com teor de umidade médio de 15%, com seção transversal de 5 x 5 cm, vão teórico de 105 cm e velocidade de carregamento de 10 MPa/min. A resistência na flexão média (f_M) obtida foi de 38 MPa.

Outra propriedade mecânica que é necessária para a análise estrutural de painéis é a resistência ao cisalhamento por rolamento (*rolling shear*), porém ela não é abordada na norma brasileira. A solução encontrada foi recorrer à norma BS EN 16351:2015, que propõe o valor da resistência ao cisalhamento por rolamento ($f_{R,m}$) de 1,1 N/mm² para painéis nos quais as superfícies laterais das tábuas não são coladas entre si.

Da mesma forma foi estimada a resistência à tração perpendicular às fibras, que foi obtida por meio da norma BS EN 338:2009, que considera o valor de $0,4 \text{ N/mm}^2$ para coníferas.

Quadro 10 – Valores médios de resistência do lote de tábuas (MPa)

$f_{t0,m}$	$f_{t90,m}$	$f_{c0,m}$	$f_{c90,m}$	$f_{M,m}$	$f_{v,m}$	$f_{R,m}$
73,8	0,4	56,8	14,2	38	8,5	1,1

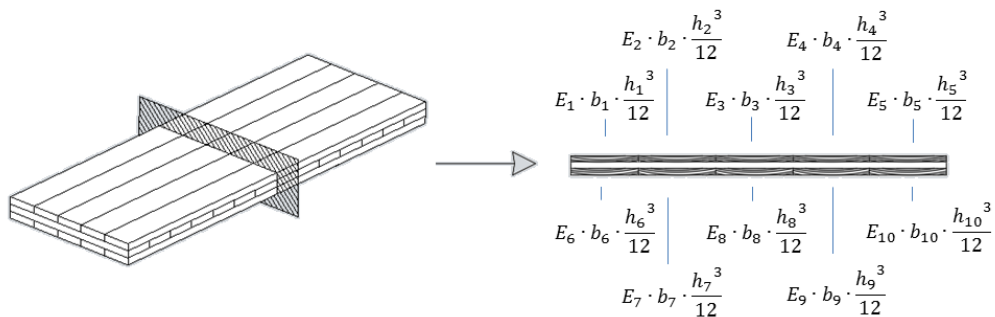
3.3.2 Método analítico

3.3.2.1 Análise de deslocamento

A estimativa dos valores de deslocamento dos painéis foi feita pelo método da analogia de cisalhamento, com o recurso de uma planilha eletrônica. Como abordado na seção 2.5.2, para calcular o deslocamento é necessário obter o $EI_{\text{eff}} (B_A + B_B)$ e o GA .

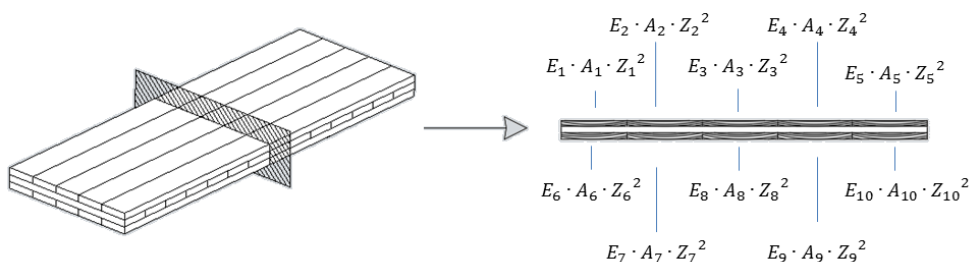
Para obter o B_A , foi somado o módulo de elasticidade multiplicando pelo momento de inércia de todas as tábuas do painel (equação 2.12), como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Esquema de análise de BA



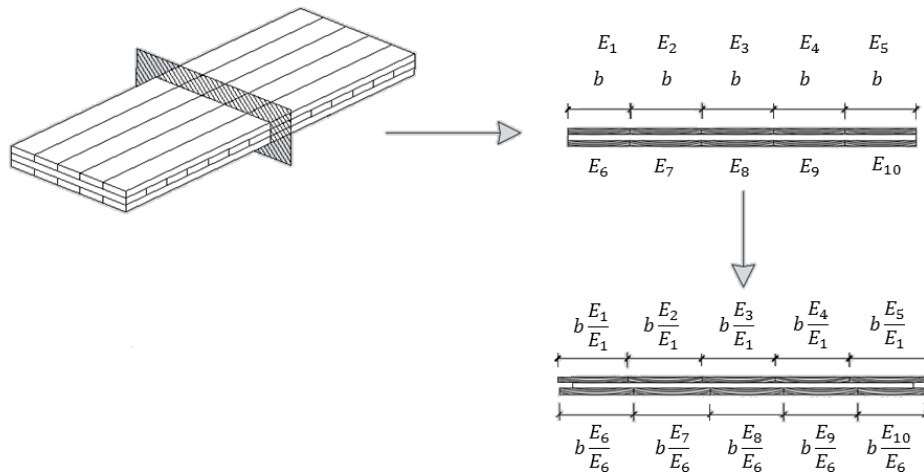
Para obter o B_B , foi somado o $E \cdot A \cdot Z^2$ de cada tábua (Figura 24), onde E_i é o módulo de elasticidade, A é a área da seção transversal de cada tábua e Z_i é a distância da linha neutra do painel até metade da espessura das tábuas (Figura 24)

Figura 24 - Esquema de obtenção de BB



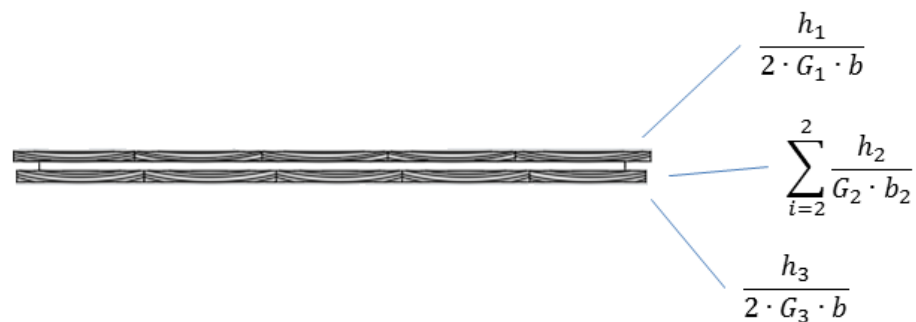
Como informado na seção 3.4.2, o modelo analítico considera a rigidez ao cisalhamento GA com um mesmo valor de módulo de elasticidade para cada camada, diferente da rigidez à flexão EI. Para a análise, foi utilizado o método da homogeneização da seção (seção 2.5.1).

Figura 25 – Seções de CLT original e transformada pelo MHS



Com a seção transformada pode-se obter o GA utilizando a equação 2.17, sendo que o h/Gb das camadas exteriores é dividido por 2 e o das camadas do meio não.

Figura 26 - Esquema de obtenção de h/Gb , necessário para calcular GA

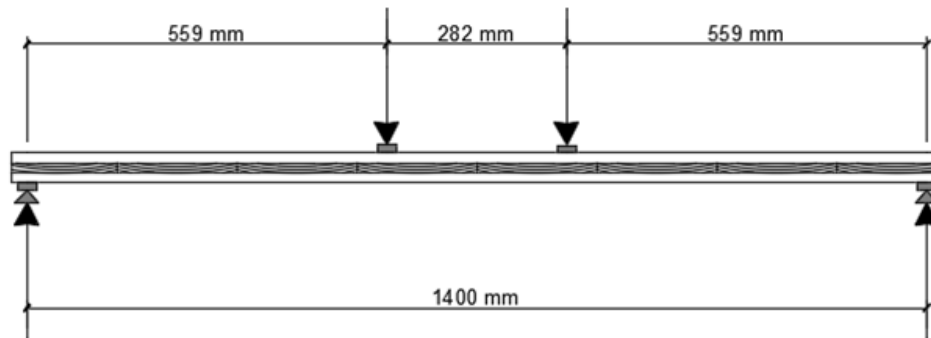


3.3.2.2 Análise de capacidade de carga dos painéis

A distância entre os apoios e os pontos de aplicação das cargas utilizados nas modelagens para a análise da resistência foi definida seguindo a norma BS EN 16351:2015. Como pode ser visto na figura 5, a distância entre os apoios deve estar entre 24h e 30h, sendo h a espessura do painel. Como a espessura dos painéis é de 4,7 cm, a distância entre apoios

deve estar entre 112,8 cm e 141 cm, sendo que o valor escolhido para a realização de um futuro ensaio foi de 140 cm. A distância entre os pontos de aplicação das cargas deve ser 6h que corresponde ao valor de 282 cm. A Figura 27 ilustra essas dimensões.

Figura 27 - Distâncias entre pontos de aplicação de cargas e apoios para o ensaio de resistência à flexão



Para obter a carga estimada de ruptura dos painéis pelo método analítico foi utilizada a teoria das vigas ligadas mecanicamente, do Anexo B do Eurocode, discutida na seção 2.5.3. Para isso, foi necessário utilizar método iterativo por meio de uma planilha no Excel até chegar ao valor de 1 para a equação 2.24. Pode-se observar no Quadro 11 que as camadas inferiores (linhas 6, 7, 8, 9 e 10) têm valor menor, porque o valor de resistência à tração longitudinal da madeira é maior que à compressão longitudinal.

Quadro 11 – Valores de planilha para obter a carga máxima num painel

P (N)	L (mm)	a (mm)	M (Nmm)
42500	1400	282	11878750
σ_{local} (MPa)	σ_{global} (MPa)	$\frac{\sigma_{global}}{f_{t/c,0}} + \frac{\sigma_{local}}{f_M}$	
1 11,23	22,59	0,991	
2 11,52	22,57	1,000	
3 11,15	22,28	0,980	
4 10,89	22,02	0,964	
5 10,74	21,71	0,951	
6 11,40	22,67	0,855	
7 10,92	22,28	0,831	
8 11,13	22,27	0,838	
9 11,22	22,18	0,839	
10 11,04	21,85	0,826	

As Figuras 30 e 31 ilustram os dados informados no programa para proceder à análise de deslocamento e de capacidade de carga, respectivamente. No Apêndice B, estão os resultados de deslocamentos gerados pelo programa e, no Apêndice C, os gráficos de distribuições de tensões na seção transversal para estimar carga teórica de ruptura dos painéis.

Figura 30 – Dados dos painéis para análise de deslocamento no programa RFEM, com carga em kN e distância em m

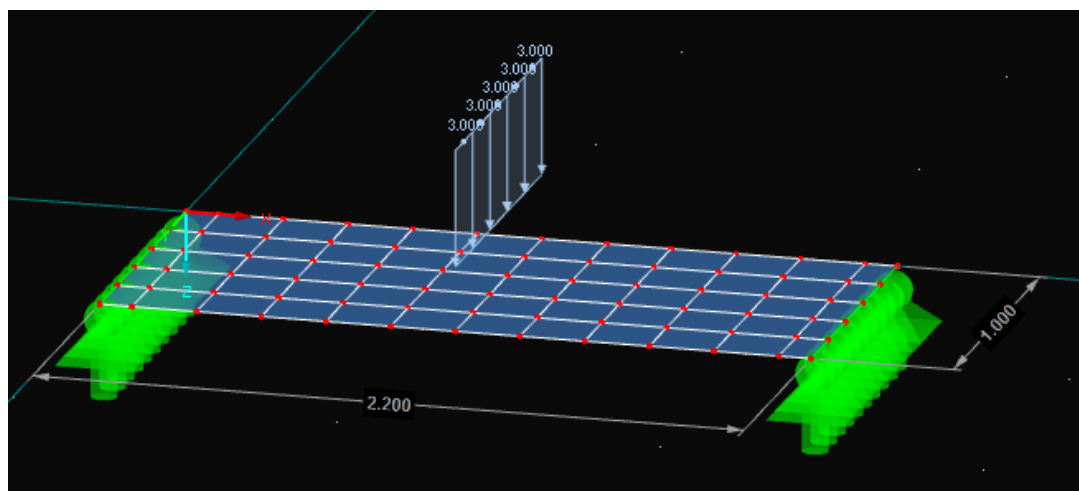
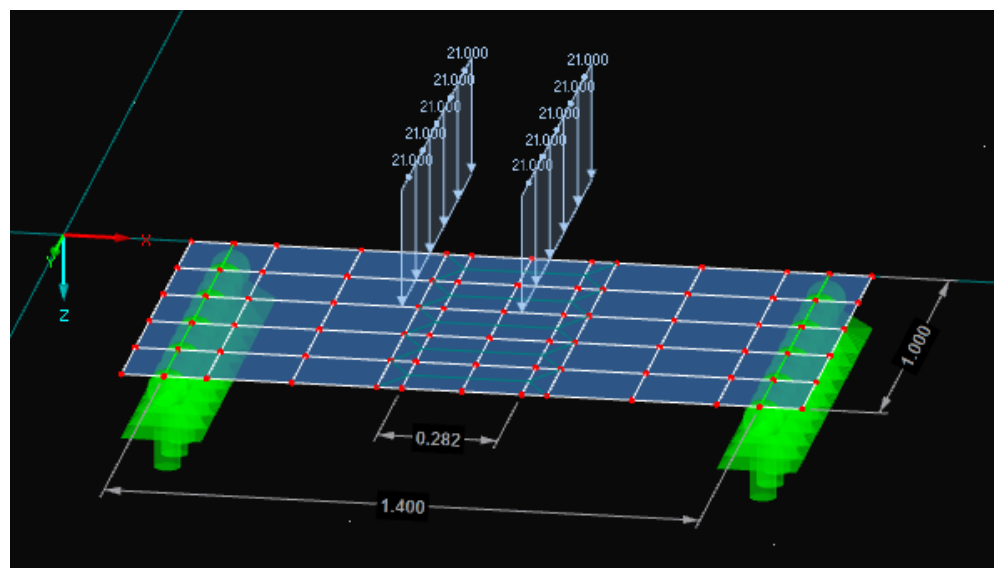


Figura 31- Dados dos painéis para análise de capacidade de carga no programa RFEM, com carga em kN e distância em m



4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 RESULTADOS E COMPARAÇÕES ENTRE DESLOCAMENTOS

Analisando os resultados que estão no Quadro 12, pode-se observar que os valores de deslocamento obtidos nas modelagens pelos métodos analítico e dos elementos finitos foram muito semelhantes entre si, com a diferença máxima entre eles de 2,8% (painel P1A). Os valores de deslocamentos experimentais de forma geral são menores que os dos modelos analítico e numérico. O único painel cujo valor experimental de deslocamento é superior aos valores estimados com as modelagens é o P3A. Talvez a justificativa esteja na variabilidade das propriedades do material que compõem os painéis.

Nota-se também que nas modelagens numéricas, os dois lados dos painéis apresentam deslocamentos muito parecidos, diferente do que se observa nos valores pelo método experimental, onde, dependendo da face A ou B do painel que estiver para baixo, o valor de deslocamento medido é diferente. Por exemplo, para o Painel P1, quando a face A está para cima (P1A), o deslocamento medido é 5,61 mm, enquanto que, com a face B para cima (P1B), o deslocamento é 6,03 mm.

No quadro 12 os painéis estão apresentados em ordem decrescente quanto ao E_x das tábuas das camadas externas ($E_{P1} > E_{P2} > E_{P3} > E_{P4} > E_{P5}$) e consequentemente os deslocamentos estão em ordem crescente ($\delta_{P1} < \delta_{P2} < \delta_{P3} < \delta_{P4} < \delta_{P5}$).

Quadro 12 - Resumo dos deslocamentos obtidos e a diferença entre eles

	Ensaio	Analítico	MEF	$\Delta\delta$ (%) Ensaio em relação ao Analítico	$\Delta\delta$ (%) Ensaio em relação ao MEF	$\Delta\delta$ (%) Analítico em relação ao MEF
	δ (mm)	δ (mm)	δ (mm)			
P1A	5,61	6,13	6,3	9,3	11,0	2,8
P1B	6,03	6,13	6,2	1,7	2,7	1,1
P2A	6,74	7,49	7,5	11,1	10,1	0,1
P2B	6,69	7,49	7,5	12,0	10,8	0,1
P3A	8,78	7,86	7,9	10,5	11,1	0,5
P3B	7,65	7,86	7,9	2,7	3,2	0,5
P4A	7,67	8,59	8,6	12,0	10,8	0,1
P4B	7,62	8,59	8,7	12,7	12,4	1,3
P5A	7,83	9,27	9,3	18,4	15,8	0,3
P5B	8,90	9,27	9,3	4,2	4,3	0,3

De maneira geral, os valores de deslocamento experimental são maiores ou superiores aos valores das modelagens, exceto no painel P3A.

Já a comparação entre os deslocamentos medidos nos ensaios e os valores estimados pelo método analítico, possui variação máxima de 18,4% (P5A) e mínima de 1,7% (P1B). Já pelo método dos elementos finitos, possui variação máxima de 15,8% (P5A) e mínima de 2,7% (P1B). Como é esperado, os mesmos painéis apresentaram variações máxima e mínima em comparação ao resultado experimental, tanto pelo método analítico quanto pelo método dos elementos finitos. Na comparação entre as variações de valores estimados pelos dois métodos aplicados, a diferença percentual variou entre 2,8% e 0,1%, valores menores aos que resultaram na comparação com os medidos experimentalmente. A diferença entre os valores de deslocamento encontrados no ensaio e nas modelagens pode ser explicada, em parte, pela heterogeneidade das propriedades da madeira, mas também, pela influência do cisalhamento nos valores de deslocamentos, pois o valor de G utilizado nas modelagens foi estimado por relações, e não obtido de forma experimental. A vinculação dos apoios da análise experimental também não foi reproduzida de forma fiel nas modelagens, visto que, no ensaio, os painéis foram apoiados em peças de madeira de seção retangular, que podem sofrer esmagamento durante a aplicação da força ou deixar que os painéis escorreguem para os lados. Este comportamento não é idêntico ao de um vínculo de segundo gênero. O valor do deslocamento analítico é dado segundo a equação 2.15, que apresenta as parcelas devidas à flexão e ao cisalhamento. Para avaliar a influência do cisalhamento no deslocamento analítico, foi calculado o deslocamento com e sem a contribuição da parcela com o módulo transversal G . O Quadro 13 mostra estes valores e a variação entre eles.

Quadro 13 - Deslocamento obtido pelo método analítico com e sem influência do cisalhamento

	δ (mm) considerando cisalhamento	δ (mm) não considerando cisalhamento	$\Delta\delta$ (%)
P1A	6,13	5,68	7,95
P1B	6,13	5,68	7,95
P2A	7,49	7,05	6,31
P2B	7,49	7,05	6,31
P3A	7,86	7,44	5,72
P3B	7,86	7,44	5,72
P4A	8,59	8,17	5,18
P4B	8,59	8,17	5,18
P5A	9,27	8,84	4,83
P5B	9,27	8,84	4,83

A partir dos resultados de deslocamento medidos nos ensaios foi possível obter o módulo de elasticidade global dos painéis, utilizando a fórmula 2.1. O Quadro 14 apresenta esses valores.

Quadro 14 - Módulo de elasticidade experimental global dos painéis

Painel	Módulo de elasticidade (MPa)
P1A	13745,6
P1B	12916,4
P2A	11283,0
P2B	11571,5
P3A	8810,5
P3B	10075,5
P4A	10034,9
P4B	10020,8
P5A	9805,9
P5B	8621,2

Como visto na seção 2.1.3, o módulo de elasticidade médio mínimo que os painéis de CLT devem apresentar, segundo a ETA 06/0138, é 12000 MPa. Se este critério fosse adotado para os resultados experimentais dos painéis, apenas o painel P1 atenderia este requisito. Destaca-se que este painel é o que contém as tábuas de maior módulo de elasticidade do lote nas camadas externas.

4.2 ANÁLISE DE CAPACIDADE DE CARGA DOS PAINÉIS

Uma vez que, no futuro, pretende-se ensaiar os painéis fabricados no CAV até o regime de ruptura, foram estimadas as cargas máximas suportadas por cada painel com base nos valores de resistência da madeira. As estimativas foram feitas pelo método analítico e pelo método dos elementos finitos.

4.2.1 Carga e tensões máximas pelo método analítico

A carga concentrada máxima de ruptura estimada para os painéis produzidos no CAV foi calculada por meio das equações 2.19 e 2.20. Como dito na seção 2.5.3, a tensão de flexão máxima do painel (σ_{\max}) é igual à tensão na camada exterior (σ_{local}) somada à tensão axial na camada externa devida à flexão (σ_{global}). O Quadro 15 apresenta os valores teóricos da força de ruptura P_{\max} e das tensões σ_{local} , σ_{global} e σ_{\max} dos painéis.

Quadro 15 - Valores das cargas máximas P_{\max} e das tensões máximas σ_{local} , σ_{global} e σ_{\max} dos painéis pelo método analítico

	P_{\max} (kN)	σ_{local} (MPa)	σ_{global} (MPa)	σ_{\max} (MPa)
P1A	53	17,76	30,04	47,80
P1B	53	17,76	30,04	47,80
P2A	58,5	16,62	31,97	48,59
P2B	58,5	16,62	31,97	48,59
P3A	60	16,10	32,01	48,10
P3B	60	16,10	32,01	48,10
P4A	61	16,35	32,53	48,88
P4B	61	16,35	32,53	48,88
P5A	60	16,72	31,64	48,35
P5B	60	16,72	31,64	48,35

4.2.2 Carga e tensões máximas pelo método dos elementos finitos

O Quadro 16 apresenta os valores da carga máxima e das tensões σ_{local} , σ_{global} e σ_{\max} obtidas utilizando o programa computacional RFEM. Os gráficos das tensões gerados pelo programa estão no Apêndice C.

Quadro 16 - Valores das cargas e tensões máximas (σ_{local} , σ_{global} e σ_{\max}) dos painéis pelo método dos elementos finitos

	P_{\max} (kN)	σ_{local} (MPa)	σ_{global} (MPa)	σ_{\max} (MPa)
P1A	54	17,09	32,64	48,87
P1B	49	17,06	31,64	48,38
P2A	58,5	16,24	32,04	48,28
P2B	58	16,39	32,13	48,47
P3A	60	16,28	32,01	48,09
P3B	60	16,37	32,43	48,80
P4A	60	16,13	32,35	48,48
P4B	60	16,20	32,29	48,42
P5A	58	16,64	32,20	48,80
P5B	61	16,54	28,63	48,19

4.2.3 Comparação e análise das cargas e tensões máximas pelos métodos analítico e de elementos finitos

Os valores de carga de ruptura estimados para os futuros ensaios dos painéis, pelos dois métodos aplicados, são mostrados lado a lado no Quadro 17. Foram calculadas as variações percentuais entre os dois valores. Como se pode observar, os valores das cargas são

próximos (entre 0 e 8,2%) para os dois métodos e os painéis com tábuas de maior E_x nas camadas externas apresentam menor força de ruptura.

Quadro 17 - Comparativo das cargas de ruptura por flexão dos painéis previstas pelo método analítico e dos elementos finitos

	Analítico	MEF	Variação
	Pmax (kN)	Pmax (kN)	ΔP (%)
P1A	53,0	54,0	-1,9
P1B	53,0	49,0	8,2
P2A	58,5	58,5	0,0
P2B	58,5	58,0	0,9
P3A	60,0	60,0	0,0
P3B	60,0	60,0	0,0
P4A	61,0	60,0	1,7
P4B	61,0	60,0	1,7
P5A	60,0	58,0	3,4
P5B	60,0	61,0	-1,6
Média	58,5	57,9	

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que, a partir das pesquisas realizadas sobre o CLT durante a realização do trabalho, que se trata de um material construtivo com grande potencial para disputar o domínio do concreto e do aço na construção civil. O fato de o produto ser composto por tábuas de madeira de reflorestamento chama atenção pelo aspecto da contribuição para a sustentabilidade e também pelo potencial de ser usado em construções no sul do Brasil, visto que é um polo da indústria de madeira serrada.

Como foi visto no trabalho, a utilização de normas e manuais estrangeiros fez-se necessária, uma vez que não existe referencial teórico brasileiro, assim como inexistente programa nacional de elementos finitos que trabalhe com CLT ou mesmo com madeira. Mesmo sendo uma tecnologia recente, ainda são poucos os estudos a respeito do material para propor uma normatização brasileira, que fomentaria o desenvolvimento de uma indústria nacional.

Os resultados de deslocamento obtidos pela modelagem analítica variaram em relação aos valores encontrados nos ensaios entre 1,7% a 18,4%, enquanto a diferença entre a modelagem pelo método dos elementos finitos e os ensaios ficou entre 2,7% e 15,8%. De maneira geral, os valores de deslocamento experimental são superiores aos valores das modelagens, exceto no painel P3A. Talvez a justificativa esteja na variabilidade das propriedades do material que compõem os painéis. Essa diferença poderia ser menor se o método de obtenção do módulo de elasticidade da tábua fosse mais preciso e se o módulo de cisalhamento não fosse obtido por relações e sim experimentalmente, visto que a relação $E=14G$ utilizada no trabalho foi apresentada por literatura baseada em espécies de madeira estrangeira, que possuem características diferentes das espécies brasileiras. Nota-se, dessa forma, a importância da caracterização mecânica dos lotes de madeira por parte da indústria, o que deve fazer parte de um programa de controle de qualidade eficiente.

Os valores de módulo de elasticidade dos painéis foram inferiores aos recomendados pelo documento técnico ETA 06/0138, com exceção do painel 1. Talvez uma forma de aumentar a rigidez dos painéis, utilizando o mesmo lote de madeira, seria usar um número maior de camadas para compor um painel, por exemplo cinco camadas, ou tábuas de espessura maiores.

Para trabalhos futuros a respeito do CLT, sugerem-se ensaios com painéis de outras espécies de floresta plantada, por exemplo, com Eucalipto, análises da influência da resistência ao cisalhamento no estado limite último de painéis, estudos sobre ligações entre os painéis com parafusos e chapas metálicas, estudos de desempenho ao fogo, comportamento

estrutural de painéis com mais camadas e otimização da disposição das tábuas para obter maior rigidez e resistência do painel.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:1997**. Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 2002.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 16351:2015**. Timber structures – Cross laminated timber – Requirements.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 338:2009**. Structural timber. Strength classes.

FPINNOVATION. **CLT Handbook** US Edition. Port-Claire, QC, Canadá, 2013.

FPINNOVATION. **CLT Handbook**, chapter 3: Structural design of cross-laminated timber elements. FPInnovations Canadá. 2011.

Dlubal Software GmbH. **RF-Laminate Manual**. Tiefenbach, Germany, 2016.

ETA 06/0138. **European Technical Approval – KLH MassivHolzplatten**. European Organisation for Technical Approvals. Viena, 2012. Disponível em: <http://www.klhuk.com/media/9379/klh_eta_certificate_en.pdf>. Acesso em 03/12/2017.

LA ROVERE, Henriette. **Aplicações do método de homogeneização da seção a vigas de madeira laminada colada**. Anais do VI EBRAMEM. Florianópolis, 1998.

ACR. **Anuário estatístico de base florestal para o estado de Santa Catarina**. Lages, 2014.

BODIG, J. e JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. Nova Iorque, 1982.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de análise estrutural 2 - deformações em estruturas, método das forças**. Porto Alegre, 1980.

MEIRELLES, Célia Regina Moretti. **Considerações sobre o uso da madeira no Brasil em construções habitacionais**. 2007.

MILANI, Alexandre Caio. **Análise de lajes planas protendidos pelo método dos elementos finitos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

D'Ávila, Virgínia Maria Rosito. **Placas e cascas – Notas de aula**. Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

Universidade Federal do Passo Fundo, Divisão de TI. **Lançamento do JWOOD**. Disponível em:

<http://www.etoools.upf.br/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=4>. Acesso em: 19/10/2017.

OOPEAA. **PUUKUOKKA HOUSING BLOCK**. Disponível em:

<<http://oopeaa.com/project/puukuokka-housing-block>>. Acesso em: 10/11/2017.

R. BARATTO. **Triptyque divulga projeto de edifício escalonado de madeira certificada na Vila Madalena**. Disponível em:

<Archdaily<https://www.archdaily.com.br/br/879936/triptyque-divulga-projeto-de-edificio-escalonado-de-madeira-certificada-na-vila-madalena>>. Acesso em: 10/11/2017

M. MOHAMMAD. **Introduction to Cross Laminated Timber**. Disponível em:

<http://www.forestprod.org/buy_publications/resources/untitled/summer2012/Volume%2022,%20Issue%20%20Mohammad.pdf>. Acesso em: 10/11/2017.

Dlubal RFEM®. Versão 5.07.

MOURA, R. De S. et al. **Modelagem Computacional do Dimensionamento de Estruturas em Madeira para Telhados Residenciais**. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (CBCTEM), 2017.

Ficha Técnica Kleiberit 501, 2017.

Dublal Software. **Exemplos introdutórios e tutoriais**. Disponível em: <<https://www.dlupal.com/pt/download-e-informacao/exemplos-e-tutoriais/exemplos-introductorios-e-tutoriais>>. Acesso em: 01/11/2017.

Dublal Software. **Manuais**. Disponível em: <<https://www.dlupal.com/pt/download-e-informacao/exemplos-e-tutoriais/exemplos-introductorios-e-tutoriais>>. Acesso em: 01/11/2017.

Dublal Software, Inc. **Youtube**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/user/DlupalEN>>. Acesso em: 01/11/2017.

APÊNDICE A – Gráficos Força x Deslocamento dos painéis ensaiados por flexão

Gráfico 1 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P1A

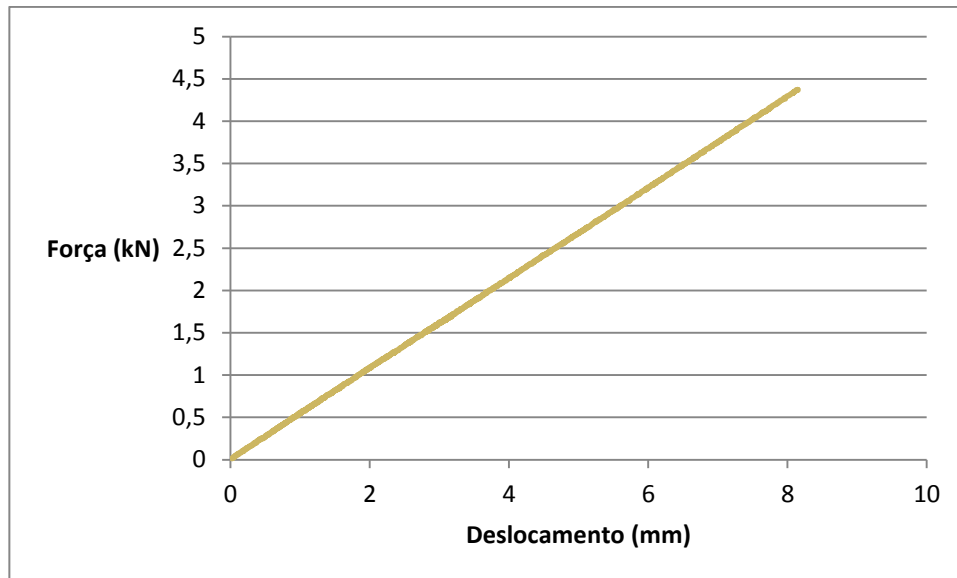


Gráfico 2 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P1B

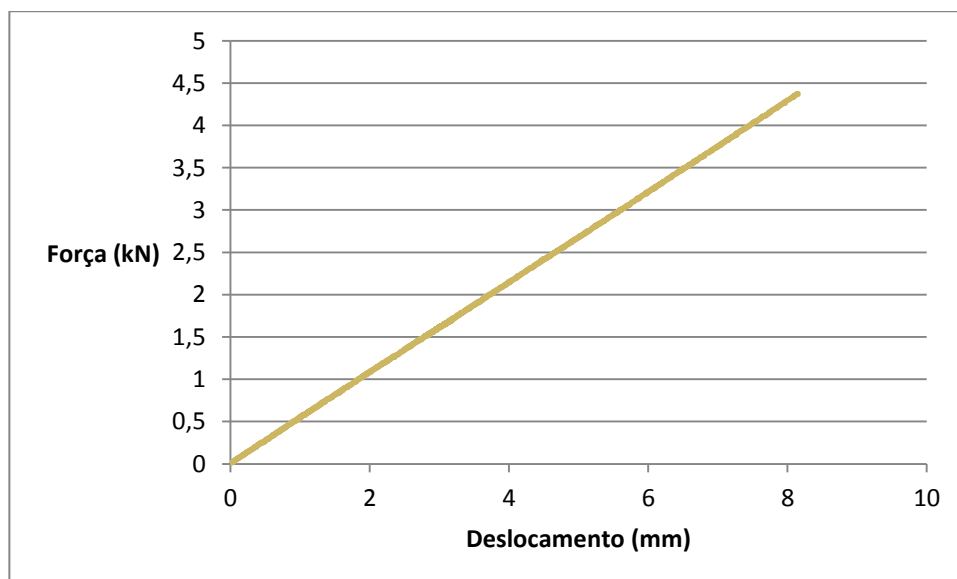


Gráfico 3 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P2A

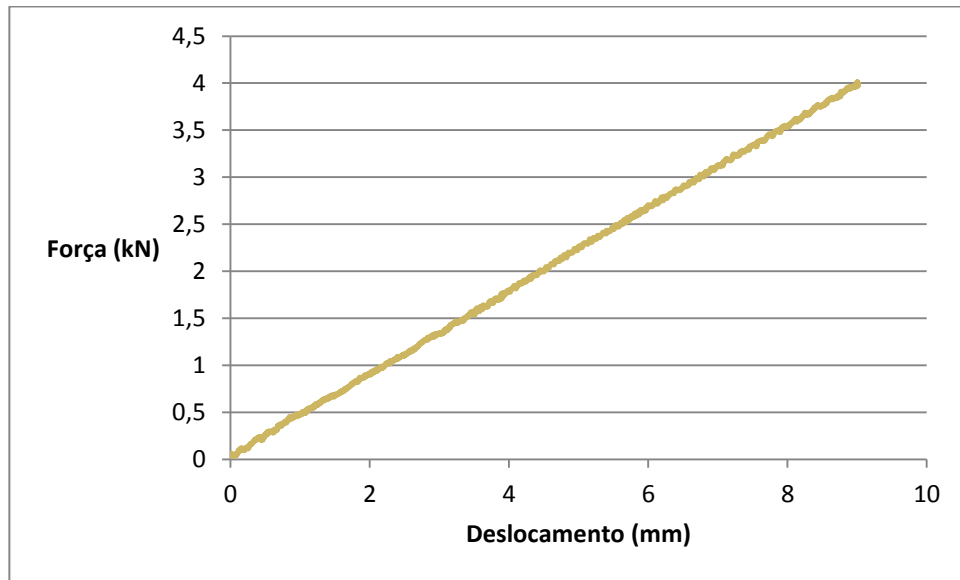


Gráfico 4 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P2B

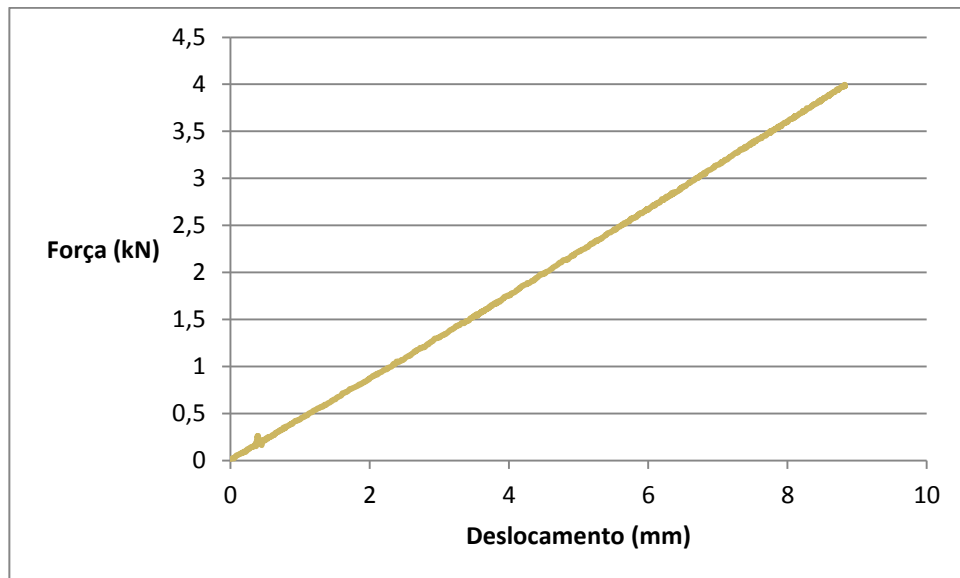


Gráfico 5 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P3A

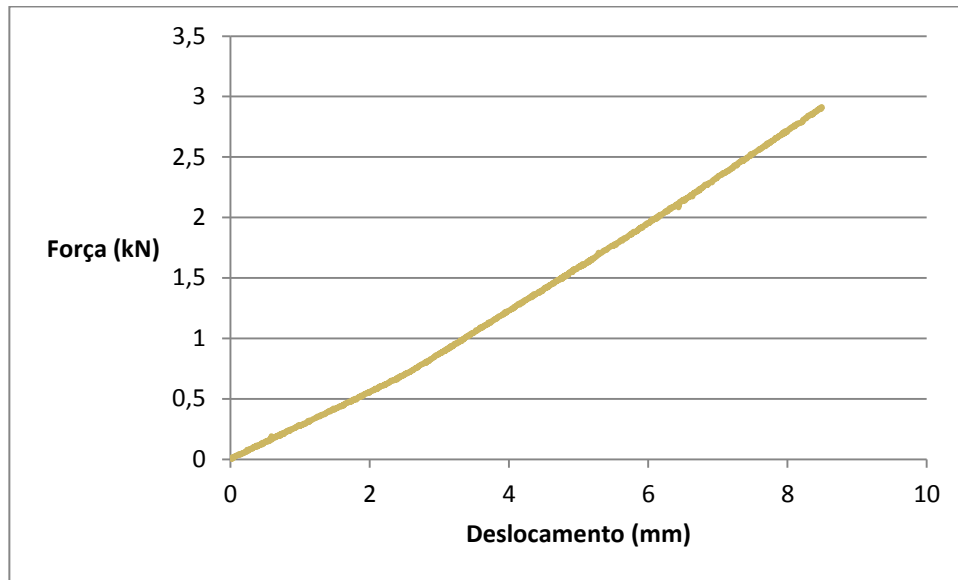


Gráfico 6 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P3B

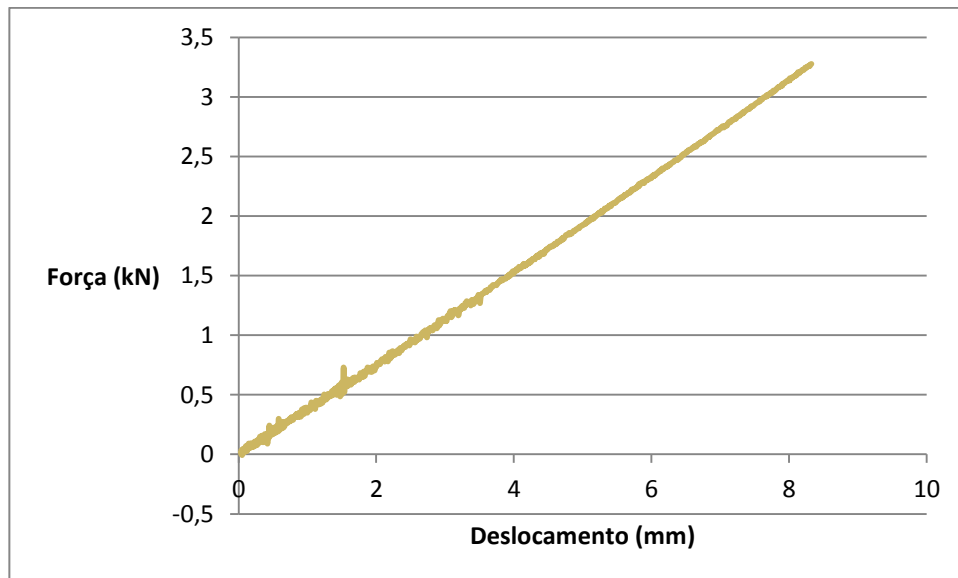


Gráfico 7 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P4A

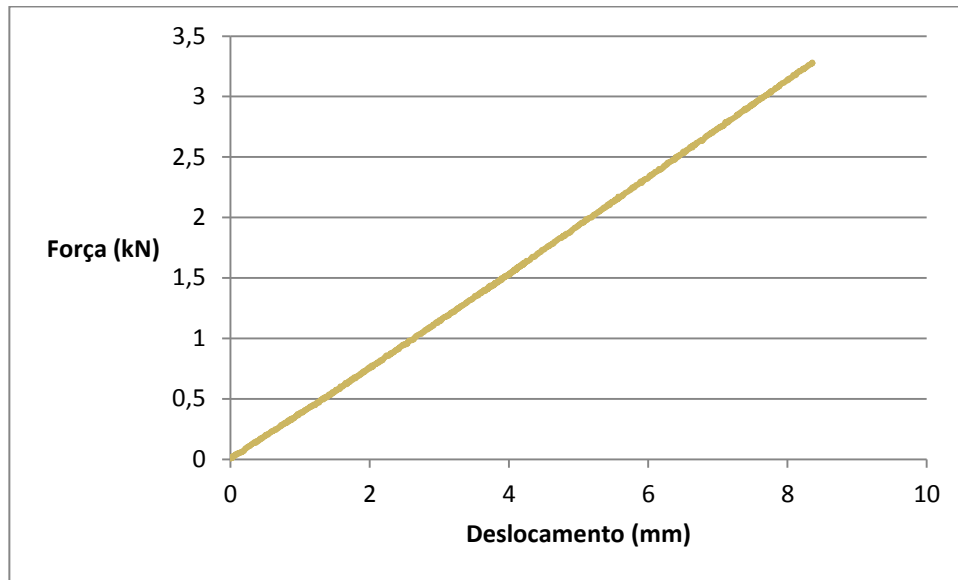


Gráfico 8 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P4B

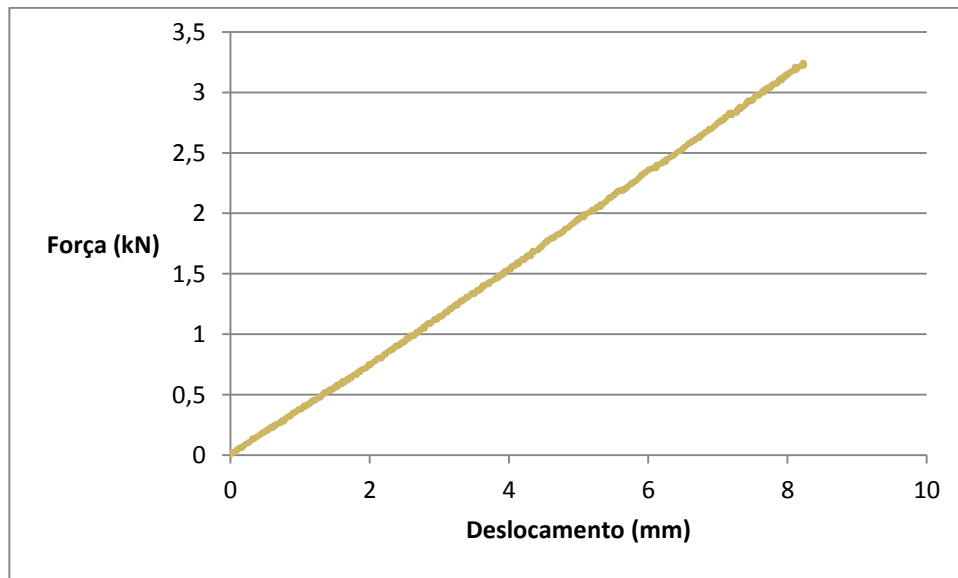


Gráfico 9 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P5A

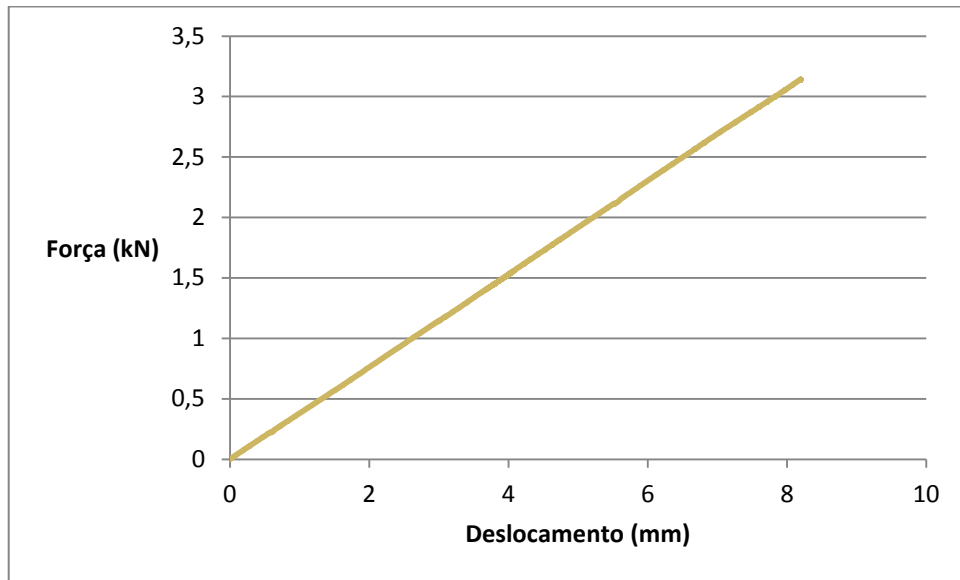
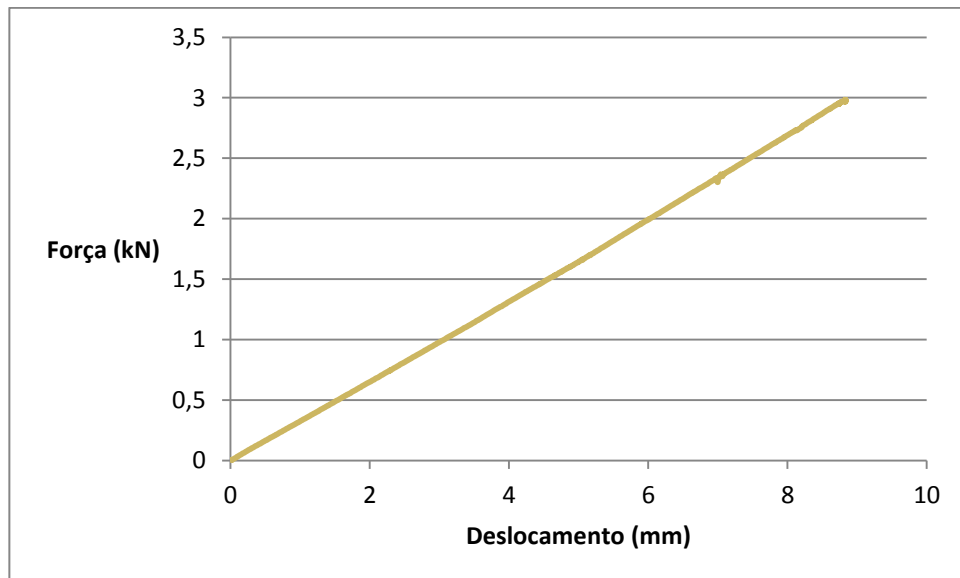


Gráfico 10 - Gráfico Força x Deslocamento do painel P5B



APÊNDICE B – Imagens dos resultados dos deslocamentos dos painéis gerados pelo RFEM

Figura 32 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P1A

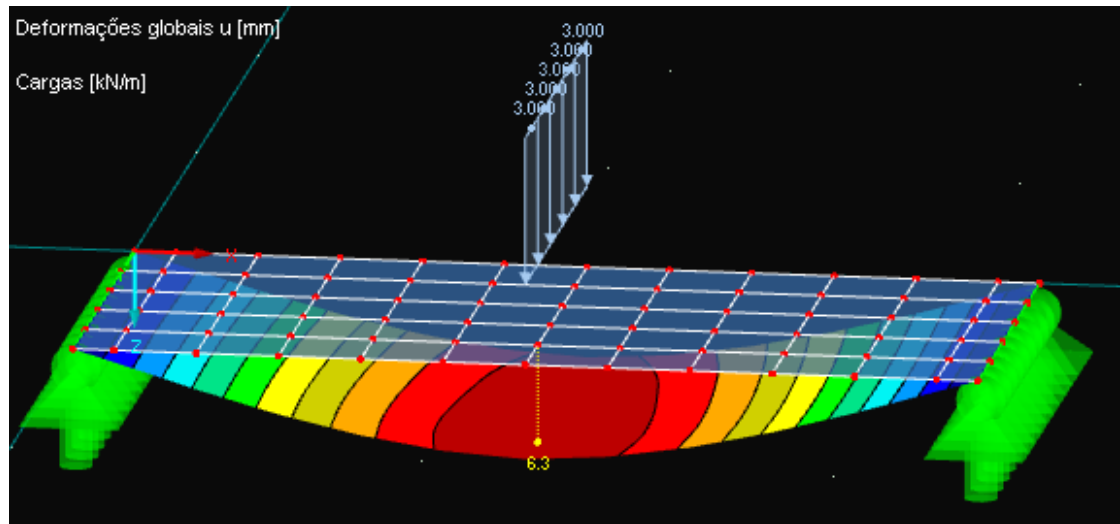


Figura 33 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P1B

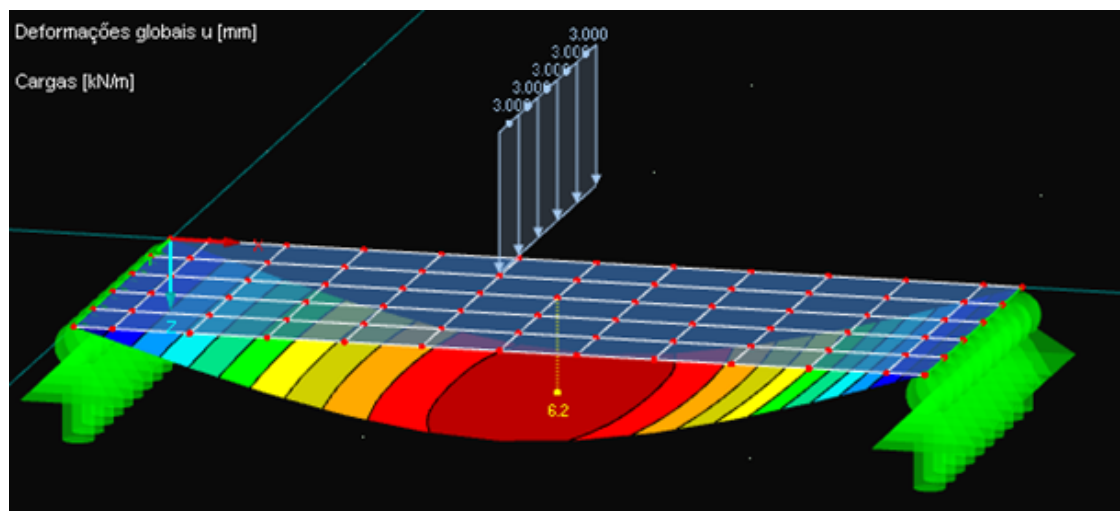


Figura 34 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P2A

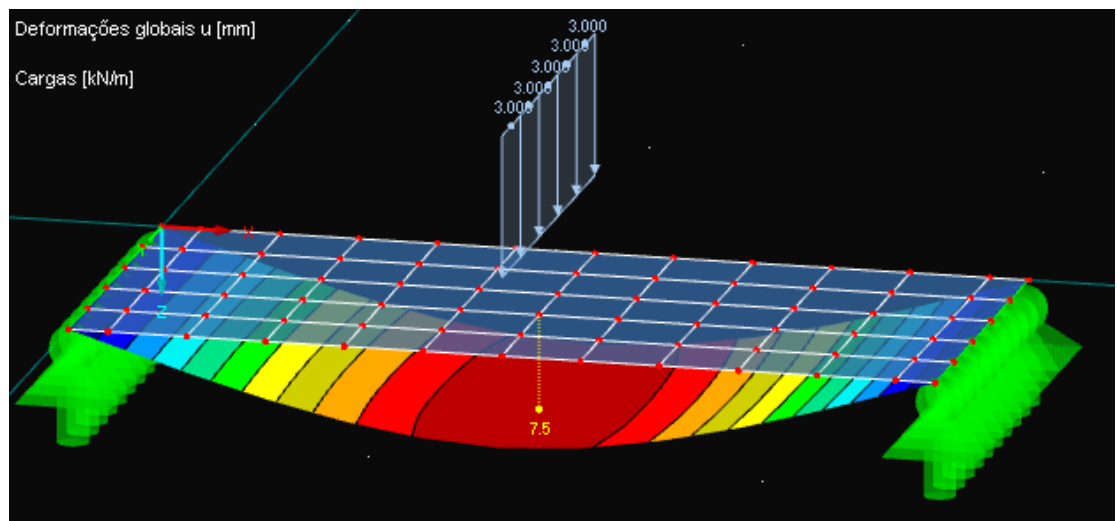


Figura 35 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P2B

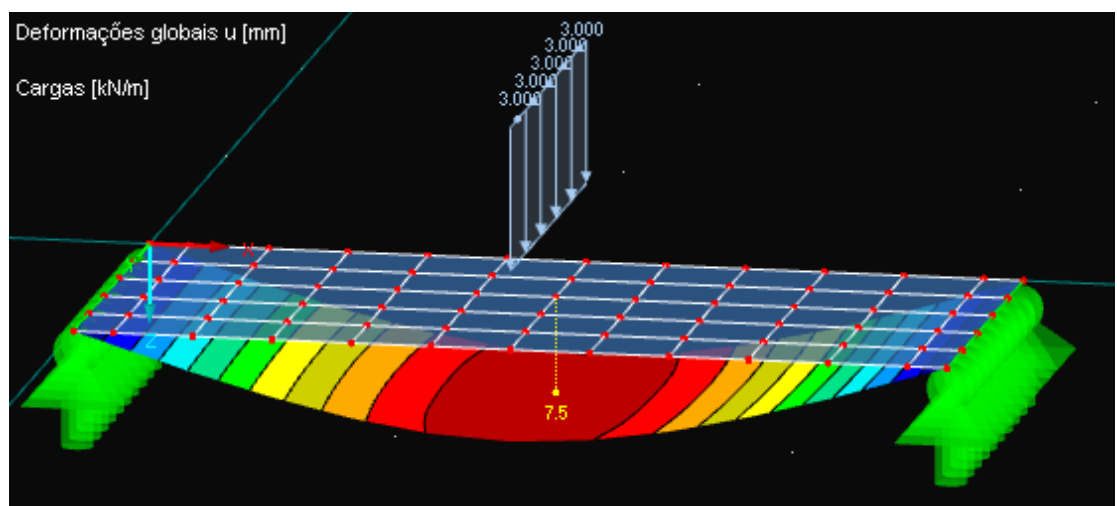


Figura 36 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P3A

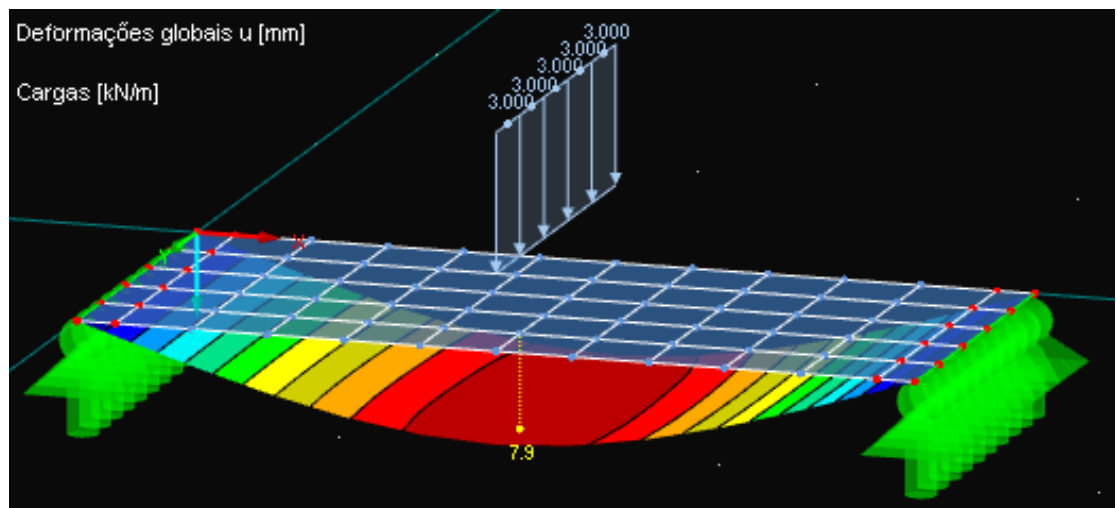


Figura 37 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P3B

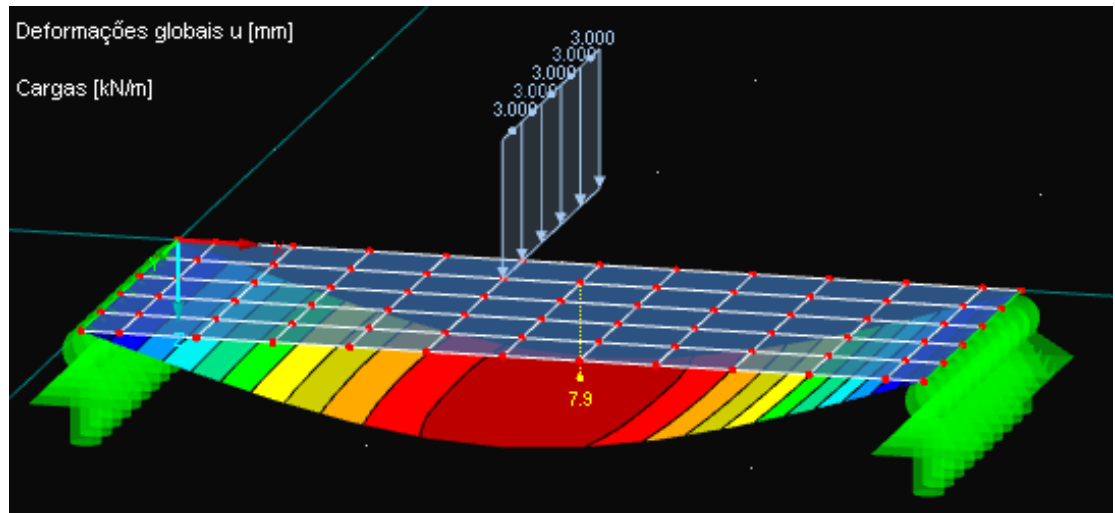


Figura 38 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P4A

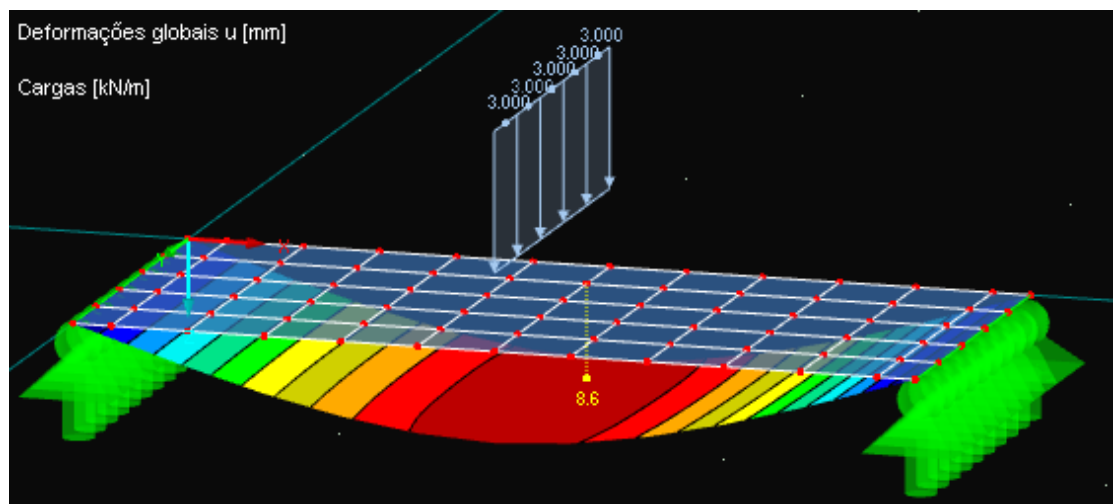


Figura 39 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P4B

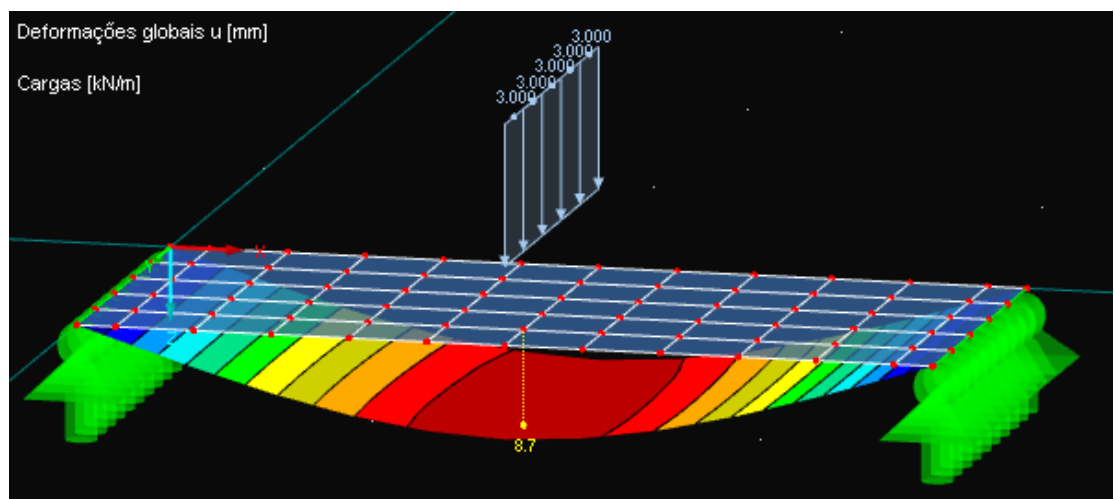


Figura 40 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P5A

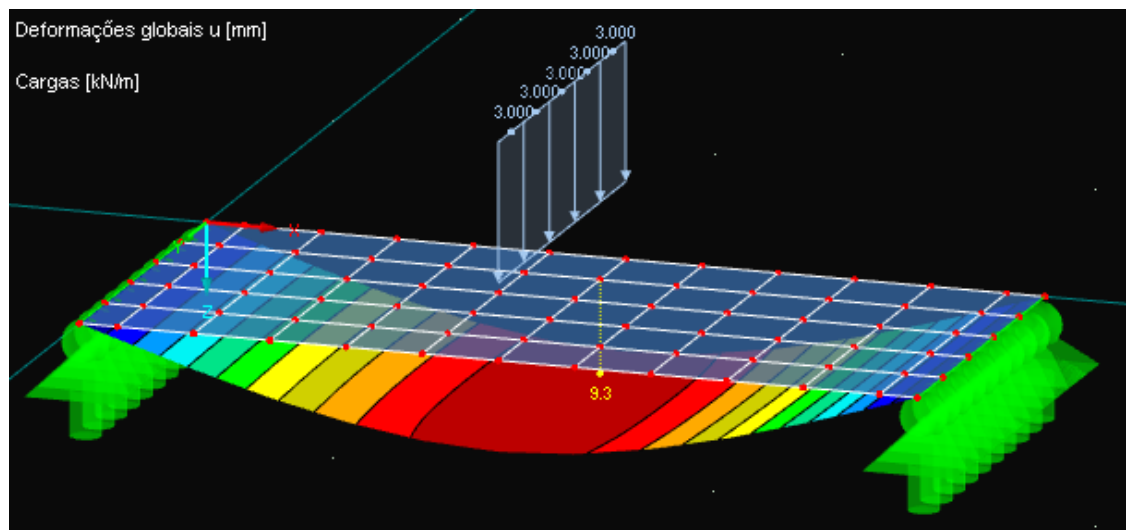
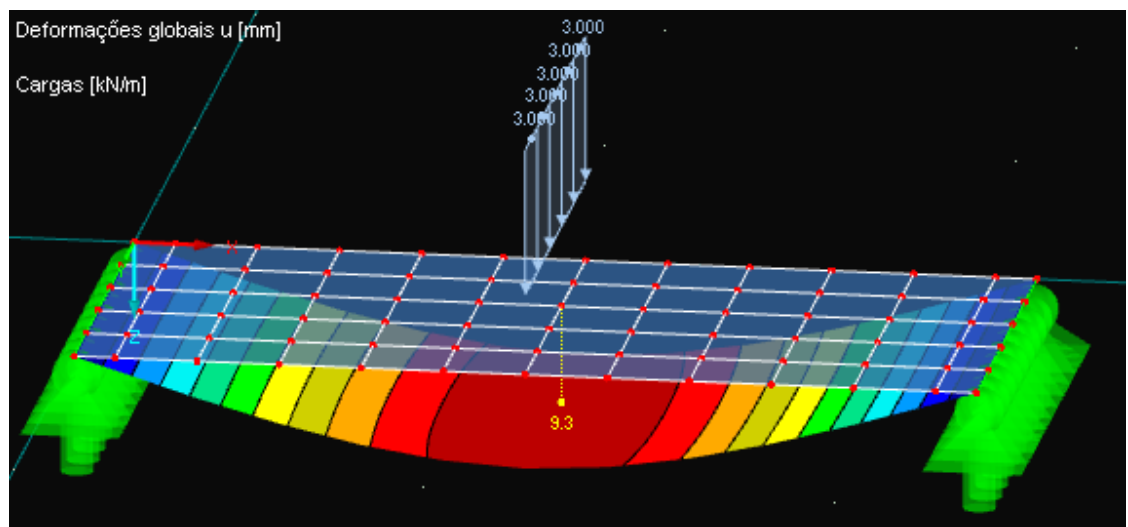


Figura 41 - Resultado da modelagem em elementos finitos do painel P5B



APÊNDICE C – Imagens dos gráficos de tensões dos painéis gerados pelo RF-Laminate

Figura 42 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P1A

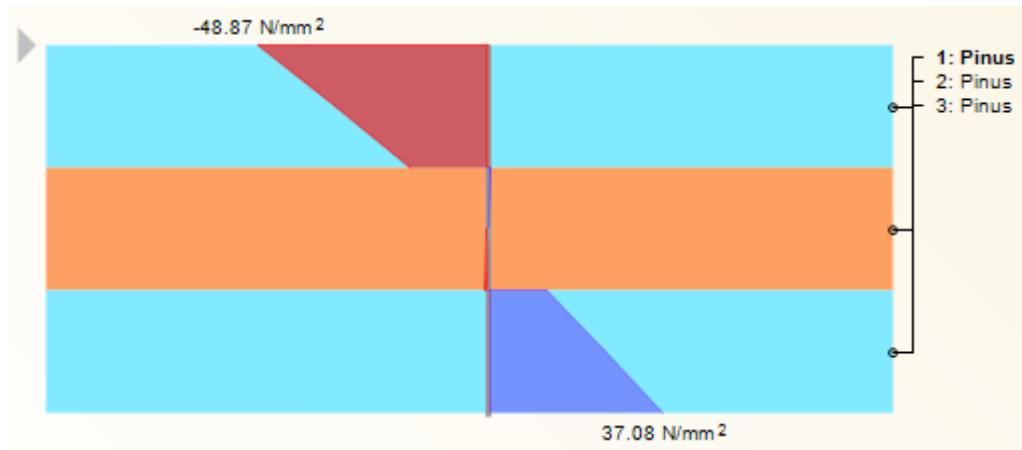


Figura 43 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P1B

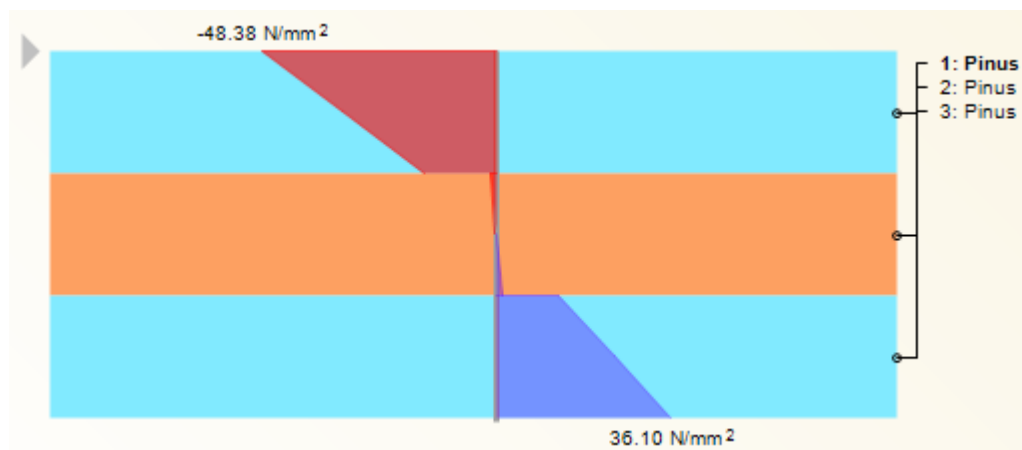


Figura 44 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P2A

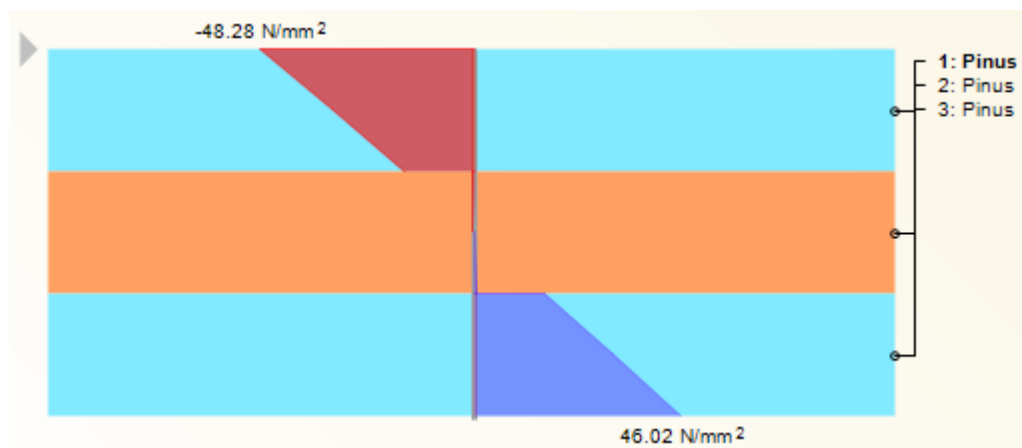


Figura 45 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P2B

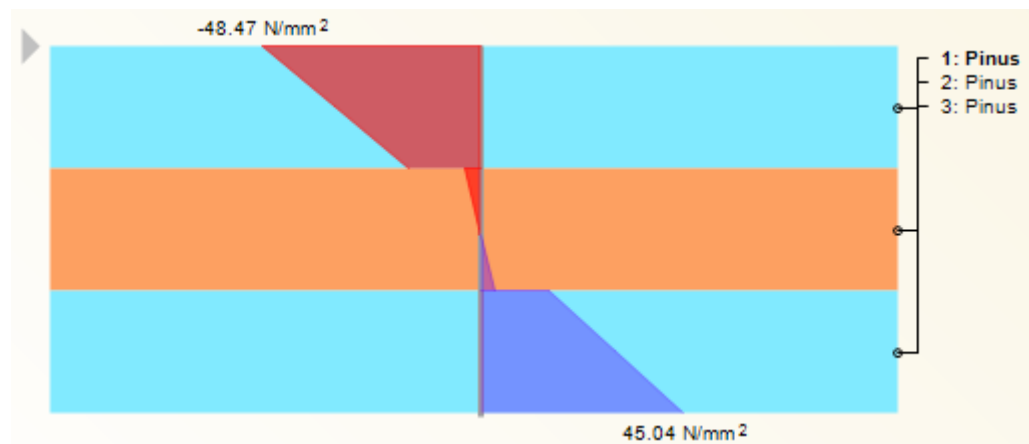


Figura 46 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P3A

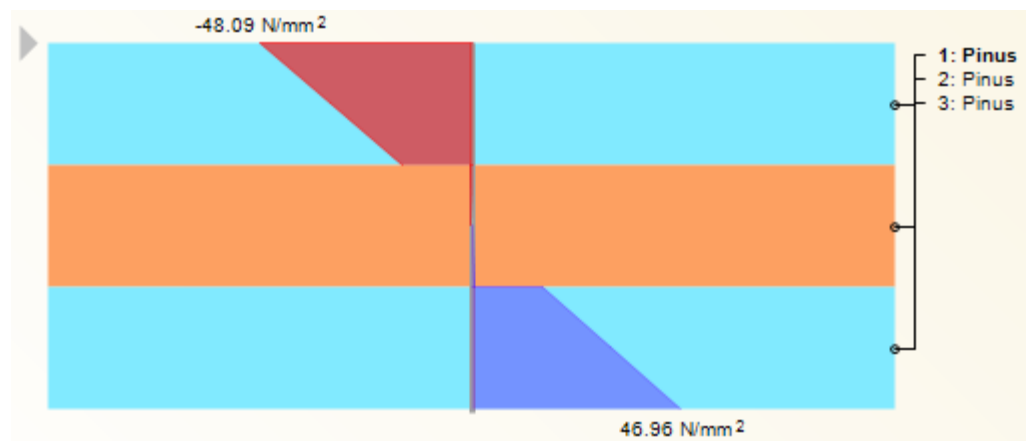


Figura 47 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P3B

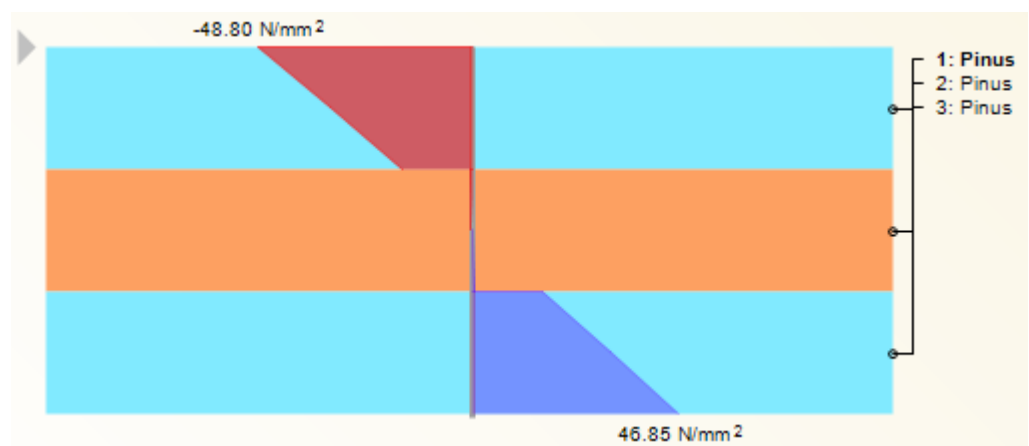


Figura 48 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P4A

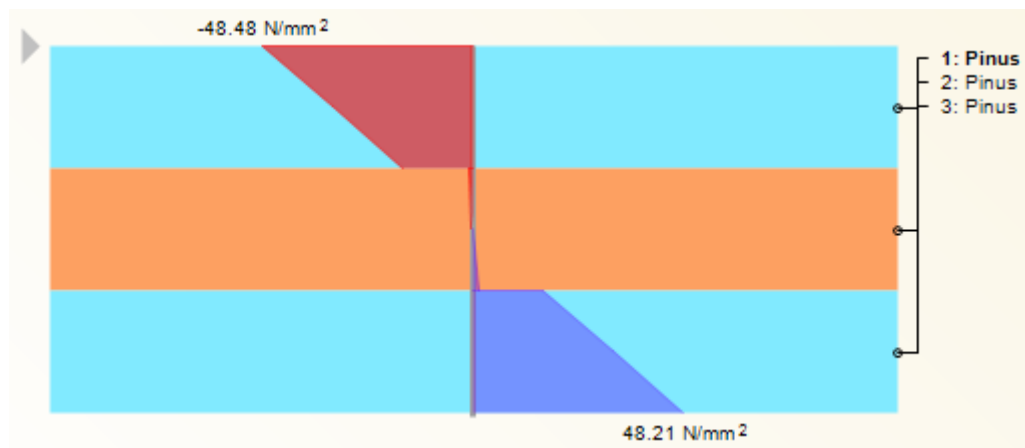


Figura 49 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P4B

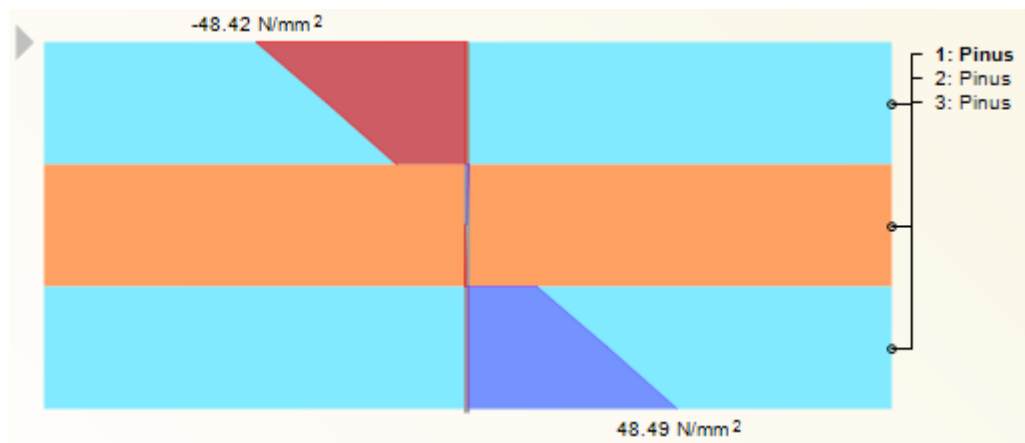


Figura 50- Gráfico da tensão de ruptura do painel P5A

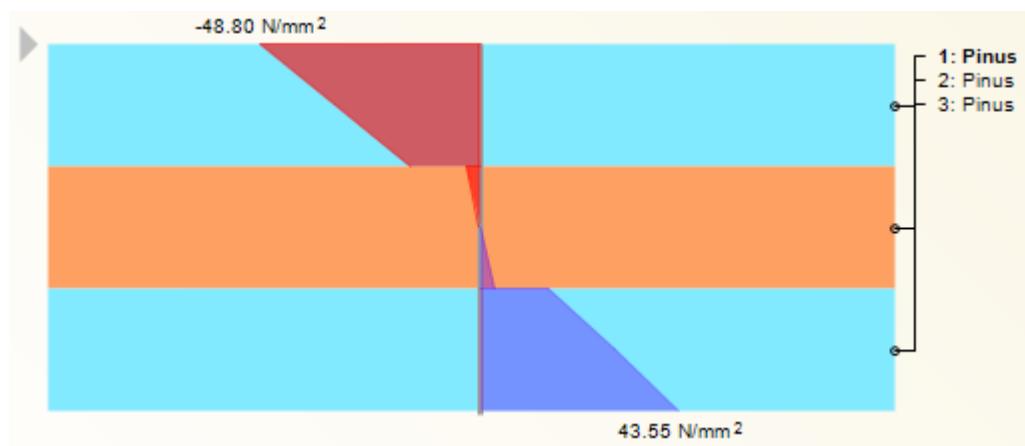


Figura 51 - Gráfico da tensão de ruptura do painel P5B

